

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Albin BOJANC

**DOLOČITEV OPTIMALNIH PARAMETROV
LASERSKEGA RAZREZA VEZANE PLOŠČE**

DIPLOMSKO DELO

Visokošolski strokovni študij

Ljubljana, 2016

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Albin BOJANC

**DOLOČITEV OPTIMALNIH PARAMETROV LASERSKEGA
RAZREZA VEZANE PLOŠČE**

DIPLOMSKO DELO
Visokošolski strokovni študij

**DETERMINATION OF OPTIMAL LASER CUTTING PARAMETERS
FOR CUTTING PLYWOOD**

GRADUATION THESIS
Higher professional studies

Ljubljana, 2016

Diplomsko delo je zaključek Visokošolskega strokovnega študija lesarstva. Opravljeno je bilo na Katedri za lepljenje, lesne kompozite in obdelavo površin na Oddelku za lesarstvo, Biotehniške fakultete, Univerze v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja visokošolske diplomske naloge imenoval prof. dr. Milana Šerneka, za somentorja doc. dr. Mirka Kariža in za recenzentko prof. dr. Manjo Kitek Kuzman.

Mentor: prof. dr. Milan ŠERNEK

Somentor: doc. dr. Mirko KARIŽ

Recenzent: prof. dr. Manja KITEK KUZMAN

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Diplomsko delo je rezultat lastnega raziskovalnega dela. Podpisani se strinjam z objavo svojega dela na spletni strani Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete. Izjavljam, da je delo, ki sem ga oddal v elektronski obliki, identično tiskani verziji.

Albin Bojanc

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Vs
DK	UDK 630*832.282
KG	furnirna vezana plošča/lasersko rezanje/rezalna hitrost
AV	BOJANC, Albin
SA	ŠERNEK, Milan (mentor)/ KARIŽ, Mirko (somentor)/ KITEK KUZMAN, Manja (recenzent)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2016
IN	DOLOČITEV OPTIMALNIH PARAMETROV LASERSKEGA RAZREZA VEZANE PLOŠČE
TD	Diplomsko delo (Visokošolski strokovni študij)
OP	XI, 52 str., 8 pregl., 37 sl., 9 pril., 17 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	Pri obdelovanju lesa z laserjem je potrebno najti kompromis med kvaliteto obdelane površine, hitrostjo obdelovanja in ekonomskim vidikom proizvodnje. V diplomskem delu smo proučevali vpliv parametrov laserskega razreza topolove furnirne vezane plošče na kakovost reza. Topolovo vezano ploščo 3 različnih debelin (10 mm, 5 mm in 4 mm), smo rezali z različnimi hitrostmi rezanja in močmi laserja z namenom določitve optimalnih parametrov rezanja za kvaliteten rez. V izhodišču smo izbrali 3 jakostne stopnje laserskega žarka (20 W, 40 W, 60 W) ter različne hitrosti rezanja (od 6 mm/s do 56 mm/s). Na podlagi meritev globine in širine reza ter izračuna kota reza (koničnost robov) in ločilne energije, smo določili optimalno hitrost in moč laserskega razreza za izbrano debelino topolove furnirne vezane plošče. Za vezano ploščo nazivne debeline 10 mm so optimalni parametri rezanja 20 W in 6 mm/s, za vezano ploščo nazivne debeline 5 mm so optimalni parametri rezanja 20 W in 16 mm/s in za vezano ploščo nazivne debeline 4 mm so optimalni parametri rezanja 20 W in 20 mm/s.

KEY WORD DOCUMENTATION

DN Vs
DC UDC 630*832.282
CX veneered plywood/laser cutting/cutting speed
AU BOJANC, Albin
AA ŠERNEK, Milan (supervisor)/ KARIŽ, Mirko (co-supervisor)/ KITEK KUZMAN, Manja (reviewer)
PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
PY 2016
TI DETERMINATION OF OPTIMAL LASER CUTTING PARAMETERS FOR CUTTING PLYWOOD
DT Graduation Thesis (Higher professional studies)
NO XI, 52 p., 8 tab., 37 fig., 9 ann., 17 ref.
LA sl
AL sl/en
AB When using laser cutting in the processing of wood, it is necessary to find a compromise between the quality of the treated surface, the speed of processing, and the economic aspects of production. In this thesis, the influence of laser cutting parameters for cutting poplar veneer plywood was studied. Three different thicknesses (10 mm, 5 mm and 4 mm) of poplar plywood boards were cut at various speeds and cutting forces of the laser in order to determine optimal parameters for the quality of cutting. As a starting point, three intensity levels of the laser beam (20 W, 40 W, 60 W) and the different cutting speeds (from 6 mm/s to 56 mm/s) were chosen. Based on measurements of the depth and width of cut and of calculation of the cutting angle (tapered edges) and separation energy, we determined the optimum speed and power of laser cutting for the selected thickness of poplar veneer plywood. For 10 mm veneer plywood, they are 20 W and 6 mm/s. For 5 mm veneer plywood, the optimal parameters of laser cutting are 20 W and 16 mm/s. For 4 mm veneer plywood, the optimal parameters of laser cutting are 20 W and 20 mm/s.

KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	III
KEY WORD DOCUMENTATION.....	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO PREGLEDNIC	VII
KAZALO SLIK	VIII
KAZALO PRILOG	X
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI	XI
1 UVOD	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA	2
1.2 CILJ RAZISKOVANJA	2
1.3 DELOVNE HIPOTEZE	3
2 PREGLED OBJAV	4
2.1 VEZANE PLOŠČE	4
2.1.1 Delitev vezanih plošč	4
2.1.2 Sestava vezane plošče	5
2.1.3 Furnirne vezane plošče.....	5
2.1.4 Razvrščanje furnirnih plošč	6
2.1.5 Tehnološki proces proizvodnje furnirnih plošč	7
2.1.6 Značilnosti lepljenja vezanih plošč	7
2.1.7 Uporaba furnirnih plošč	8
2.2 LASER	8
2.2.1 Laser in tvorjenje laserskega žarka	8
2.2.2 Lastnosti laserske svetlobe	10
2.2.3 Interakcija laserske svetlobe s snovjo	11
2.2.4 Vrste laserjev.....	14
2.2.5 CO ₂ laser.....	14
2.3 LASERSKI RAZREZ VEZANE PLOŠČE	16
3 MATERIAL IN METODE	18
3.1 MATERIALI	18
3.1.1 Furnirna vezana plošča	18
3.1.2 Označevanje preizkušancev	19
3.1.3 Laser	19
3.2 METODE RAZISKAVE	20
3.2.1 Metoda razrezovanja furnirne vezane plošče	20
3.2.2 Merjenje globine reza.....	21
3.2.3 Merjenje širine reza.....	22
3.2.4 Računanje koničnosti reza.....	23
3.2.5 Računanje ločilne energije.....	24

4	REZULTATI.....	25
4.1	GLOBINA REZA	25
4.1.1	Merjenje globine reza na vezani plošči nazivne debeline 10 mm.....	25
4.1.2	Merjenje globine reza na vezani plošči nazivne debeline 5 mm.....	26
4.1.3	Merjenje globine reza na vezani plošči nazivne debeline 4 mm.....	27
4.2	ŠIRINA REZA.....	28
4.2.1	Merjenje širine reza na vezani plošči nazivne debeline 10 mm.....	28
4.2.2	Merjenje širine reza na vezani plošči nazivne debeline 5 mm.....	31
4.2.3	Merjenje širine reza na vezani plošči nazivne debeline 4 mm.....	34
4.3	KONIČNOST REZA	38
4.3.1	Izračun koničnosti reza na vezani plošči debeline 10 mm	38
4.3.2	Izračun koničnosti reza na vezani plošči debeline 5 mm	39
4.3.3	Izračun koničnosti reza na vezani plošči debeline 4 mm	40
4.4	LOČILNA ENERGIJA.....	41
4.4.1	Izračun ločilne energije razreza vezane plošče nazivne debeline 10 mm ..	41
4.4.2	Izračun ločilne energije razreza vezane plošče nazivne debeline 5 mm ...	42
4.4.3	Izračun ločilne energije razreza vezane plošče nazivne debeline 4 mm ...	43
5	RAZPRAVA IN SKLEPI.....	44
5.1	RAZPRAVA.....	44
5.1.1	Globina reza	44
5.1.2	Širina reza	45
5.1.3	Koničnost reza	46
5.1.4	Ločilna energija	47
5.2	SKLEPI.....	48
6	POVZETEK.....	50
7	VIRI	52
ZAHVALA		
PRILOGE		

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Valovne dolžine nekaterih komercialnih laserjev (Valentinčič in sod., 2012)	10
Preglednica 2: Optimalni parametri za rezanje lesa in lesnih kompozitov s CO ₂ laserjem (Powell, 1993)	16
Preglednica 3: Podatki o uporabljenem stroju za laserski razrez vezane plošče	19
Preglednica 4: Testirane kombinacije treh parametrov razreza furnirne vezane plošče z laserjem	20
Preglednica 5: Optimalni parametri razreza furnirne vezane plošče z vidika globine reza in kapacitete stroja	45
Preglednica 6: Optimalni parametri razreza furnirne vezane plošče z vidika širine reza	46
Preglednica 7: Optimalni parametri razreza furnirne vezane plošče z vidika koničnosti reza	46
Preglednica 8: Optimalni parametri razreza furnirne vezane plošče z vidika ločilne energije	47
Preglednica 9: Vrednosti ločilne energije pri optimalnih parametrih razreza furnirne vezane plošče	47

KAZALO SLIK

Slika 1: Delitev vezanega lesa (Čermak, 1996).....	4
Slika 2: Simetrija vezane plošče glede na srednjico plošče (Nikolič, 1988).....	5
Slika 3: Načini zlaganja furnirja za troslojno vezano ploščo (Nikolič, 1988).....	6
Slika 4: Fizikalni princip delovanja laserskega resonatorja (Valentinčič in sod., 2012).....	9
Slika 5: Odvisnost hitrosti rezanja z laserjem glede na debelino materiala in lasersko moč (Valentinčič in sod., 2012)	11
Slika 6: Zaporedje absorpcijskih dogodkov s stopnjevanjem absorbirane moči, pri obdelovanju kovine (Valentinčič in sod., 2012).....	12
Slika 7: Shematski prikaz laserskega rezanja (Powell, 1993)	13
Slika 8: Prikaz nihanja atomov pri CO ₂ laserjih (Ready, 1997).....	15
Slika 9: Prerez topolove furnirne vezane plošče nazivne debeline 10 mm (osebni arhiv, julij 2016).....	18
Slika 10: Prerez topolove furnirne vezane plošče nazivne debeline 5 mm (osebni arhiv, julij 2016).....	18
Slika 11: Prerez topolove furnirne vezane plošče nazivne debeline 4 mm (osebni arhiv, julij 2016).....	18
Slika 12: Fotografija CO ₂ laserja, uporabljenega pri razrezu furnirnih vezanih plošč (osebni arhiv, maj 2016).....	19
Slika 13: Izdelane zareze v preizkušane nazivne debeline 5 mm pri 40 W moči laserskega žarka, (povečevanje hitrosti rezanja od leve proti desni) (osebni arhiv, julij 2016)	21
Slika 14: Slika laserskega reza v vezani plošči, posneta na mikroskopu in prikaz merjenja globine reza (osebni arhiv, maj 2016)	21
Slika 15: Mikroskop s pomočjo katerega smo poslikali laserske reze v vezani plošči (osebni arhiv, maj 2016).....	22
Slika 16: Slika laserskega reza v vezani plošči, posneta na mikroskopu in prikaz merjenja širine reza (osebni arhiv, julij 2016).....	23
Slika 17: VP10; Povprečna globina reza v odvisnosti od hitrosti rezanja pri različnih močeh laserja.....	25
Slika 18: VP5; Povprečna globina reza v odvisnosti od hitrosti rezanja pri različnih močeh laserja.....	26
Slika 19: VP4; Povprečna globina reza v odvisnosti od hitrosti rezanja pri različnih močeh laserja.....	27
Slika 20: VP10; Povprečna širina reza zgoraj in spodaj v odvisnosti od hitrosti rezanja pri moči laserja 20W	28
Slika 21: VP10; Povprečna širina reza zgoraj in spodaj v odvisnosti od hitrosti rezanja pri moči laserja 40W	29
Slika 22: VP10; Povprečna širina reza zgoraj in spodaj v odvisnosti od hitrosti rezanja pri moči laserja 60W	29
Slika 23: VP10; Povprečna širina reza zgoraj in spodaj v odvisnosti od hitrosti rezanja pri različnih močeh laserja	30
Slika 24: VP5; Povprečna širina reza zgoraj in spodaj v odvisnosti od hitrosti rezanja pri moči laserja 20W	31

Slika 25: VP5; Povprečna širina reza zgoraj in spodaj v odvisnosti od hitrosti rezanja pri moči laserja 40W	32
Slika 26: VP5; Povprečna širina reza zgoraj in spodaj v odvisnosti od hitrosti rezanja pri moči laserja 60W	32
Slika 27: VP5; Povprečna širina reza zgoraj in spodaj v odvisnosti od hitrosti rezanja pri različnih močeh laserja	33
Slika 28: VP4; Povprečna širina reza zgoraj in spodaj v odvisnosti od hitrosti rezanja pri moči laserja 20W	34
Slika 29: VP4; Povprečna širina reza zgoraj in spodaj v odvisnosti od hitrosti rezanja pri moči laserja 40W	35
Slika 30: VP4; Povprečna širina reza zgoraj in spodaj v odvisnosti od hitrosti rezanja pri moči laserja 60W	36
Slika 31: VP4; Povprečna širina reza zgoraj in spodaj v odvisnosti od hitrosti rezanja pri različnih močeh laserja	37
Slika 32: VP10; Povprečna koničnost reza v odvisnosti od hitrosti rezanja pri različnih močeh laserja	38
Slika 33: VP5; Povprečna koničnost reza v odvisnosti od hitrosti rezanja pri različnih močeh laserja	39
Slika 34: VP4; Povprečna koničnost reza v odvisnosti od hitrosti rezanja pri različnih močeh laserja	40
Slika 35: VP10; Povprečna ločilna energija razreza vezane plošče v odvisnosti od hitrosti rezanja pri različnih močeh laserja	41
Slika 36: VP5; Povprečna ločilna energija razreza vezane plošče v odvisnosti od hitrosti rezanja pri različnih močeh laserja	42
Slika 37: VP4; Povprečna ločilna energija razreza vezane plošče v odvisnosti od hitrosti rezanja pri različnih močeh laserja	43

KAZALO PRILOG

- PRILOGA A: Rezultati meritev rezanja furnirne vezane plošče nazivne debeline 10 mm, z močjo laserja 20 W
- PRILOGA B: Rezultati meritev rezanja furnirne vezane plošče nazivne debeline 10 mm, z močjo laserja 40 W
- PRILOGA C: Rezultati meritev rezanja furnirne vezane plošče nazivne debeline 10 mm, z močjo laserja 60 W
- PRILOGA D: Rezultati meritev rezanja furnirne vezane plošče nazivne debeline 5 mm, z močjo laserja 20 W
- PRILOGA E: Rezultati meritev rezanja furnirne vezane plošče nazivne debeline 5 mm, z močjo laserja 40 W
- PRILOGA F: Rezultati meritev rezanja furnirne vezane plošče nazivne debeline 5 mm, z močjo laserja 60 W
- PRILOGA G: Rezultati meritev rezanja furnirne vezane plošče nazivne debeline 4 mm, z močjo laserja 20 W
- PRILOGA H: Rezultati meritev rezanja furnirne vezane plošče nazivne debeline 4 mm, z močjo laserja 40 W
- PRILOGA I: Rezultati meritev rezanja furnirne vezane plošče nazivne debeline 4 mm, z močjo laserja 60 W

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

- a – širina reza laserskega žarka na zgornji strani VP
- b – širina reza laserskega žarka na spodnji strani VP
- c – globina reza (mm)
- CO₂ – ogljikov dioksid
- E – ločilna energija (J/mm)
- MDF – vlaknena vezana plošča (ang. Medium Density Fibreboard)
- P – moč (W)
- sod. – sodelavci
- UF – urea-formaldehidno lepilo
- v – hitrost (mm/s)
- VP – vezana plošča
- VP4 – vezana plošča nazivne debeline 4 mm
- VP5 – vezana plošča nazivne debeline 5 mm
- VP10 – vezana plošča nazivne debeline 10 mm
- α – koničnost reza (°)

1 UVOD

Vezana plošča se prvič omenja v Egiptu, okoli 3500 let nazaj, še v času faraonov. Grki in Rimljani so uporabljali vezane plošče predvsem za pohištvo. Od sredine 19. stoletja je bila posodobljena vezana plošča uporabljena pri izdelavi pianov in pohištva, zlasti čajnih mizic. Vezane plošče, kot jih poznamo danes, so kot vsestranski konstrukcijski material ugledale svojo luč v 1930-ih, ko so se za lepljenje začele uporabljati vodoodporne sintetične smole, ki so dale vezani plošči dolgo življenjsko dobo in integriteto. V sedanjem času strmimo k izpopolnitvi proizvodnih in kontrolnih postopkov izdelave furnirnih vezanih plošč, saj je le to ključnega pomena za zagotavljanje željenih lastnosti.

Prvi poskusi uporabe laserja za razrez materialov so se pojavili v 60. letih prejšnjega stoletja in so navdušili znanstveni svet, vendar je do resne uporabe in prenosa laserja v pakirno industrijo minilo še 20 let. Zaradi ugodnih lastnosti uporabe laserja, se je nato njegova uporaba v industriji močno razširila v več aplikacij. Njegovo moč reza in natančnost izkoriščamo predvsem pri procesih razreza različnih sodobnih materialov, kot tudi kovin, plastike, gume, lesa, keramike in raznih kompozitov.

Z namenom ugotovitve optimalnih pogojev laserskega razreza nerjavečega jekla in plastičnih materialov je že bilo narejenih veliko raziskav. Laserski razrez lesa pa je ena od prvih aplikacij, ki se je uporabljala za proizvodni proces in sicer v pakirni industriji. Kmalu so ugotovili njihovo uporabo tudi v pohištveni industriji, kjer je mogoče dobiti popolnoma avtomatiziran proces rezanja, na primer razrez vezanih plošč za izdelovanje intarzij.

Proces rezanja z laserjem poteka po mehanizmu termomehanske razgradnje (sežiganje) materiala, zato ima novo nastala površina značilno črno barvo. Ta potemnjena plast je posledica ostanka ogljika, do katerega pride zaradi kemijskega razpada celuloze v lesu, kar pa včasih dejansko izkoriščamo kot dekorativni učinek.

V primerjavi s konvencionalnimi metodami je zelo natančen rez ena izmed glavnih prednosti laserskega rezanja lesa, poleg tega pa so rezi ozki in rezana površina izredno gladka. Obdelovanec pri rezanju z laserjem ni izpostavljen visokim mehanskim obremenitvam, emisije hrupa so nižje, zmanjšana je količina žagovine in obraba orodij, boljši je izkoristek materiala ter višja hitrost rezanja.

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

V lesnoobdelovalni industriji se srečujemo z vrsto strojev in naprav, ki morajo na konkurenčnem trgu proizvajati kvalitetne proizvode s čim manjšimi stroški. Ni dovolj samo študija o ustrezni izbiri strojev in naprav, temveč tudi to, da te naprave v času delovanja dajejo optimalne rezultate. Izbira obdelovalnega procesa je v veliki meri odvisna od željene novonastale površine, ki nastaja ob stiku orodja in obdelovanca. Pri izdelovanju proizvodov je pomembna tako geometrija kot tudi tekstura oblikovanih površin. Obe lastnosti močno vplivata na estetiko in tehnično brezhibnost izdelka in sta odvisni od izbire obdelovalnega procesa in obdelovalnih parametrov, ki tekom proizvodnje značilno vplivajo na končni izdelek. Nepravilna izbira obdelovalnih parametrov nam na izdelku lahko pusti neugodne posledice.

Pri laserskem rezanju lesa imamo opravka z več parametri. Prvi so vezani na sam laser (laserska moč žarka, premer žarka, valovna dolžina, vrsta leče, premer fokusnega žarka, goriščna razdalja, fokusna dolžina ...), drugi so vezani na material obdelovanca (absorptivnost laserske svetlobe, toplotna prevodnost, debelina materiala, sestava materiala, nehomogenost lesa ...) in zadnji so vezani na kinematiko (hitrost rezanja, lega fokusa in usmerjenost žarka). Za rezanje lesa moramo uporabiti optimalne parametre, ki dajejo kvaliteten rez, omogočajo ugodno delovanje stroja in ki zagotavljajo visoko produktivnost.

V diplomskem delu se bomo osredotočili na vpliv spreminjanja osnovnih dveh parametrov laserja: moči laserskega žarka in hitrosti rezanja, pri različnih debelinah topolove furnirne vezane plošče, na kakovost reza.

1.2 CILJ RAZISKOVANJA

Pri laserskem razrezu topolove furnirne vezane plošče treh različnih debelin (10 mm, 5mm in 4 mm) moramo ugotoviti optimalna parametra:

- moč laserskega žarka in
- hitrost rezanja,

ki bosta nudila najugodnejši rezultat (kvaliteten rez).

1.3 DELOVNE HIPOTEZE

Postavili smo sledeče hipoteze:

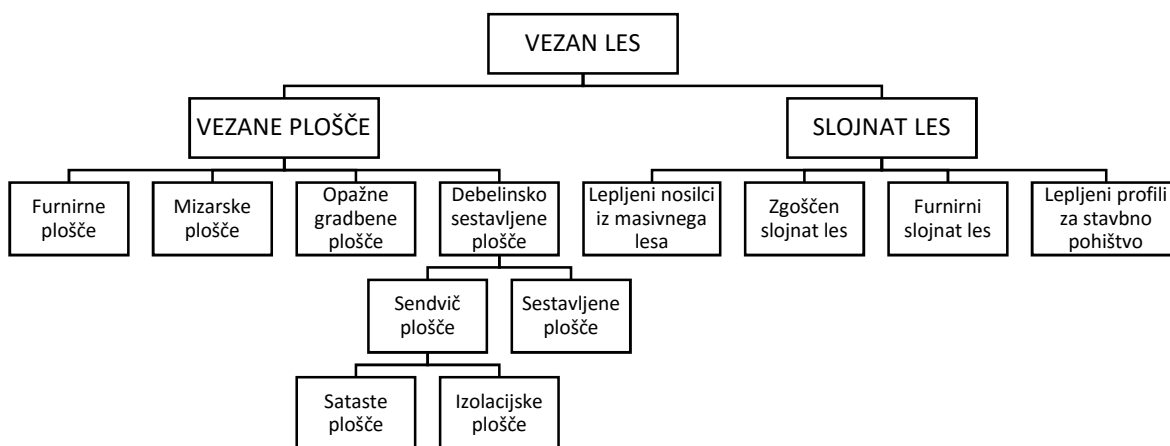
- Hipoteza 1: Povečanje moči laserskega žarka omogoča večjo hitrost rezanja pri enaki debelini obdelovanca oziroma večje globine rezanja pri enaki hitrosti rezanja.
- Hipoteza 2: Večja moč povzroči povečanje širine reza, zaradi večjega vnosa toplote poslabša kakovost novo nastale površine, v skrajnih situacijah pa leseni obdelovanec lahko celo zagori.
- Hipoteza 3: Predvidevamo, da lepilo med slojema furnirjev vezane plošče vpliva na globino reza - globina reza bo pogosto segala samo do območja lepilnega spoja dveh furnirjev vezane plošče.
- Hipoteza 4: S poskusi bomo uspeli definirati optimalno hitrost laserskega rezanja topolove furnirne vezane plošče različnih debelin.
- Hipoteza 5: S poskusi bomo uspeli definirati optimalno moč laserskega žarka za rezanje topolove furnirne vezane plošče.

2 PREGLED OBJAV

2.1 VEZANE PLOŠČE

2.1.1 Delitev vezanih plošč

Vezane plošče po definiciji (Šernek, 2007) izdelujemo tako, da med seboj lepimo več slojev lesa ali drugih materialov. Posamezni sloji so lepljeni pod kotom, da zmanjšamo delovanje lesa in povečamo trdnost izdelka. Vezane plošče uvrščamo v veliko skupino vezanega lesa, ki se deli v dve podskupini, kot je prikazano na sliki 1 (Čermak, 1996).



Slika 1: Delitev vezanega lesa (Čermak, 1996)

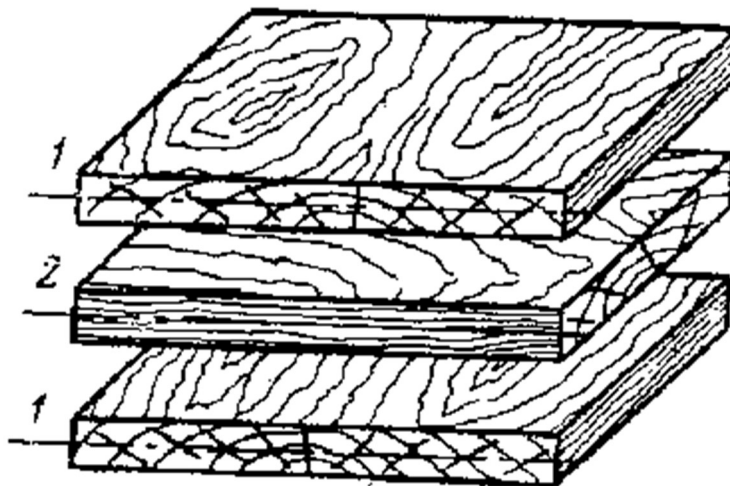
Industrijska proizvodnja vezanih plošč je bila znana že v začetku 19. stoletja, vendar se je močneje začela razvijati šele po prvi svetovni vojni. Ta izdelek je rezultat prizadevanja, da se masiven les zamenja z lesnim kompozitom, ki ima izboljšane fizikalne in mehansko-tehnološke lastnosti (Čermak, 1996).

V primerjavi z masivnim lesom imajo vezane plošče izboljšane lastnosti (Čermak, 1996):

- zaradi križnega položaja posameznih slojev je krčenje in nabrekanje omejeno (med 0,1-0,4 %), ki ga lahko zanemarimo,
- pri masivnem lesu je delovanje lesa veliko večje (v radialni smeri med 2,3-6,8 %; v tangencialni smeri med 6-11,8 %),
- trdnost je podobna v vzdolžni in prečni smeri,
- masiven les ima največjo trdnost v smeri lesnih vlaken,
- povečana je odpornost proti razpokanju, medtem ko masiven les pri žebljanju in večjih omejitvah ob robovih rad razpoka,
- imamo možnost proizvodnje ukrivljenih plošč.

2.1.2 Sestava vezane plošče

Prvo pravilo sestave vezanih plošč, je pravilo simetrije (Mešič, 1998). Os simetrije je na sredini srednjega sloja plošče, kot je prikazano na sliki 2. Na vsako stran osi se nalagajo furnirji enake debeline, enakega poteka lesnih vlaken, iste vlažnosti, drevesne vrste in tehnike izdelave. Vezane plošče izdelujejo iz neparnega števila furnirnih listov, kjer os simetrale poteka po lesu in ne po lepilnem sloju (Nikolić, 1988).



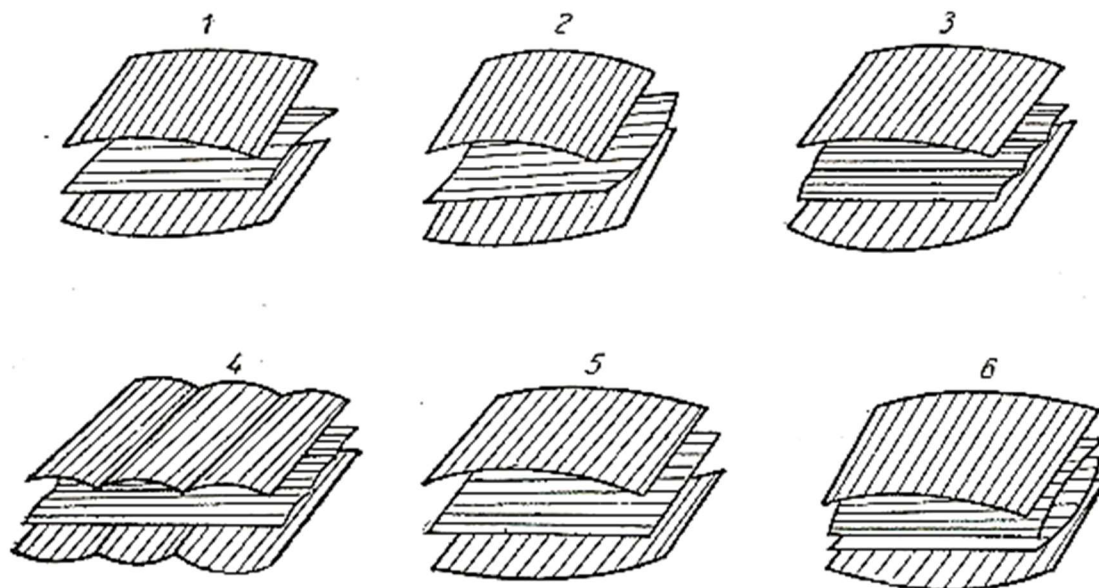
Slika 2: Simetrija vezane plošče glede na srednjico plošče (Nikolić, 1988)

Nikolić (1988) navaja, da ob višanju števila slojev narašča tudi izotropnost vezane plošče. Iz tega izhajajoč je plošča sestavljena iz več tanjših furniranih listov kvalitetnejša. Najpogostejša sestava vezanih plošč je, da se potek lesnih vlaken križa pod pravim kotom t. j. 90° . Z manjšanjem kota poteka lesnih vlaken pod 90° , se bistveno povečuje kakovost vezanih plošč. Take plošče, kjer so furnirni listi zloženi pod kotom med 15° do 60° , imajo sestavo v obliki zvezde.

2.1.3 Furnirne vezane plošče

Furnirne vezane plošče so narejene iz tankih listov furnirja, ki so zlepljeni med seboj tako, da je vsak naslednji list (sloj) obrnjen glede na predhodnega za 90° - t. i. križno lameliranje. Plošče imajo vedno neparno število slojev (Šernek, 2007).

Nikolić (1988) navaja najpogostejše debeline furnirja za zunanji sloj 1,1; 1,4; 1,5 in 1,6 mm. Za srednje, notranje sloje plošče so najpogostejše debeline furnirnih listov 2,2; 2,6; 3,2 in 3,6 mm. Pri sestavi plošč se pazi, da so konkavne strani zunanjih furniranih listov obrnjene proti sredici, kot je prikazano na sliki 3, ker so vedno nekoliko bolj razpokane.



Slika 3: Načini zlaganja furnirja za troslojno vezano ploščo (Nikolič, 1988)

2.1.4 Razvrščanje furnirnih plošč

Furnirne vezane plošče Čermak (1996) in Šernek (2007) razvrščata po naslednjem sistemu:

Po številu slojev:

- troslojne (tripleks) furnirne plošče,
- večslojne (multipleks) furnirne plošče.

Po namenu (glede na vrsto lepila):

- plošče za notranjo uporabo,
- plošče za prostore s povečano stopnjo vlažnosti,
- plošče za zunanjo uporabo,
- plošče za ladjedelništvo.

Po načinu uporabe:

- za pohištveno proizvodnjo,
- za izdelavo vrat,
- za gradbeništvo,
- za železniške vagone, karoserije, silose,
- za embalažo.

2.1.5 Tehnološki proces proizvodnje furnirnih plošč

Tehnološki proces proizvodnje furnirnih vezanih plošč se deli v tri faze (Šernek, 2007):

1. proizvodnja luščenega furnirja,
2. priprava furnirja,
3. izdelava plošč,

ki zajemajo navedeno zaporedje delovnih operacij (Čermak, 1996):

- skladiščenje furnirske hlodovine,
- čiščenje, čeljenje in krojenje hlodovine v luščence,
- hidrotermična obdelava luščencev,
- luščenje furnirja na luščilnikih,
- medoperacijsko skladiščenje furnirja,
- krojenje furnirja in izrez na mokrih škarjah,
- sušenje furnirja v sušilnicah,
- sortiranje furnirja po sušenju in krpanje grč,
- spahovanje robov furnirja na paketnem rezkalniku ali paketnih škarjah,
- širinsko sestavljanje furnirja,
- konstrukcija in stiskanje furnirnih plošč,
- formatno obrezovanje plošč,
- kondicioniranje plošč,
- krpanje in popravilo napak,
- brušenje plošč na brusilnem stroju,
- klasifikacija in skladiščenje plošč.

2.1.6 Značilnosti lepljenja vezanih plošč

Lepilo je nekovinska snov, ki je zmožna zlepidi dve površini zaradi površinskega zlepljenja in notranjih sil adhezije in kohezije (Šernek, 2007).

Pri lepljenju furnirnih plošč so najbolj pogosta urea-formaldehidna (UF), melamin-formaldehidna (MF), fenol-formaldehidna (FF), poliizocianatna (pMDI), resorcinol-formaldehidna (RF) ali polivinilacetatna (PVAc) lepila. Izbira lepila je odvisna od končne uporabe plošče. Za uporabo v suhih in ne vlažnih pogojih se večinoma uporablja PVAc in UF lepila, medtem kot se za zahtevnejše razmere uporablja MF, FF, pMDI in RF lepila. Za lepljenje vezanih plošč je največkrat uporabljena mešanica MF in UF, imenovana melamin-urea-formaldehidno lepilo (MUF). Prednost teh lepil je, da lahko daje različne stopnje vodoodpornosti in različne vremenske odpornosti proti zunanji uporabi, vlažnosti in notranji klimi. Te lastnosti dajejo plošči široko področje uporabnosti in sprejemljivo ceno (Resnik, 1997).

K postopku lepljenja furnirnih vezanih plošč pristopamo z definicijo naslednjih korakov (Šernek, 2007):

- izbira lepila,
- priprava lepilne mešanice,
- nanašanje lepila,
- tlak lepljenja,
- temperatura lepljenja,
- stiskanje - lepljenje.

2.1.7 Uporaba furnirnih plošč

Furnirne vezane plošče spadajo med lesne kompozite z izredno širokim področjem uporabe. V pohištveni industriji uporabljamo navadne in oplemenitene plošče, najbolj pogosto v debelinah med 4 do 20 mm.

Uporaba furnirnih plošč v gradbeništvu vse bolj narašča, njihove lastnosti so opredeljene s posebnim standardom. Uporabljamo jih za pregradne stene, za notranjo ureditev prostorov, za oblaganje zidov koncertnih dvoran ...

Vodoodporne plošče uporabljamo v industriji vozil, pri izdelavi železniških vagonov, karoserij ter povsod tam, kjer je potrebna povečana odpornost na vlago. Avionske furnirne plošče (debeline 0,6 do 12 mm) morajo imeti posebne lastnosti, uporabljajo pa jih v proizvodnji športnih jadralnih letal.

Posebno skupino furnirnih plošč predstavljajo oblikovane plošče, ki jih uporabljamo v proizvodnji sedežnega, kopalniškega in podobnega pohištva. Konstrukcija in proizvodnja oblikovanih plošč poteka po istem zaporedju kot proizvodnja ravnih furnirnih plošč, le da je stiskanje opravljeno v primernih kalupnih (običajno visokofrekvenčnih) stiskalnicah (Čermak, 1996).

2.2 LASER

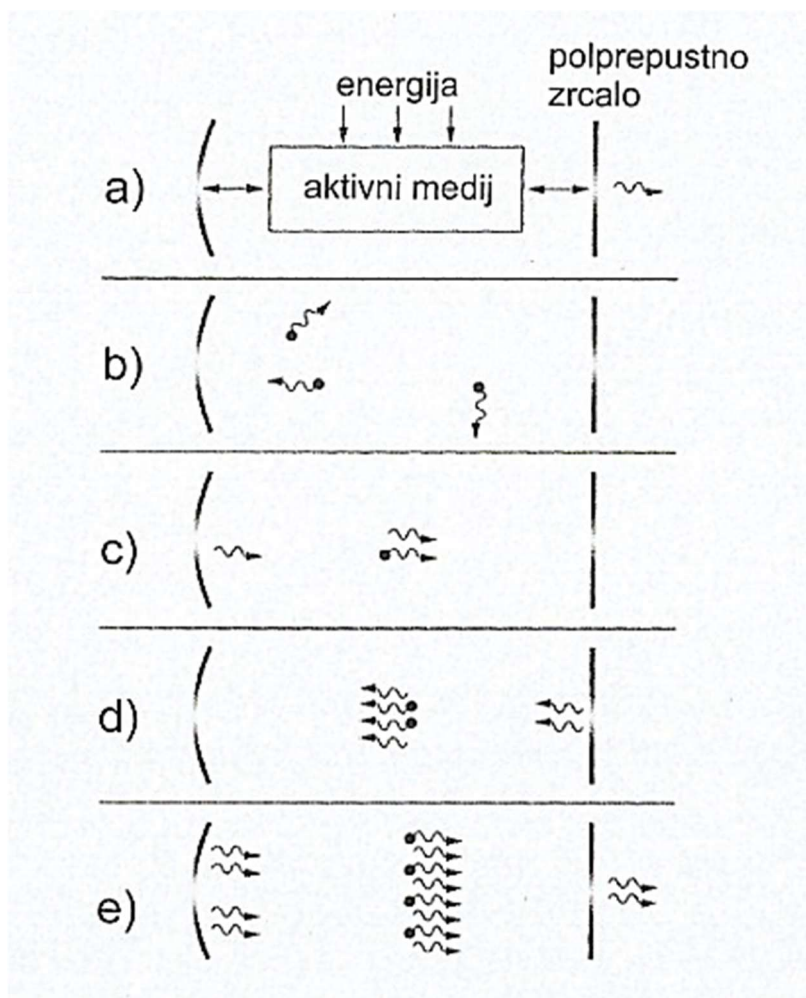
2.2.1 Laser in tvorjenje laserskega žarka

Beseda LASER je akronim za besedno zvezo »Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation«, kar v prevodu pomeni ojačevanje svetlobe s stimulirano emisijo sevanja. Laser je torej optična naprava, ki seva koherentni snop fotonov (Valentinčič in sod., 2012).

Laser je sestavljen iz treh osnovnih delov (Steen, 2003):

- sredice oziroma aktivnega medija, ki je kristal ali cev s tekočino ali plinom, kamor dovajamo energijo,
- napajalne naprave, ki lahko proizvaja močne bliske svetlobe ali močne radijske valove,
- resonatorja (funkcionalna enota), ki ustvarja stoječe elektromagnetno valovanje in natančno usmeritev laserskega curka (dve vzporedni zrcali – eno neprepustno, drugo polprepustno).

Na sliki 4.a je prikazana postavitve aktivnega medija med dve zrcali. Vnos energije v aktivni medij povzroča spontano emisijo svetlobe z določeno valovno dolžino. Skica 4.b prikazuje razširitev svetlobe v mediju na vse strani. Pojav stimulirane emisije se zgodi, ko se foton odbije od zadnjega zrcala in trči ob atom aktivnega medija, ki odda nov identičen svetlobni delec (prikazuje slika 4.c). Neprekinjen odboj novih svetlobnih delcev skozi aktivni medij med dvema zrcaloma ojača laserski žarek, kot prikazuje slika 4.d. Zrcalo na drugi strani je polprepustno in se uporablja za usmerjanje laserskega žarka ven iz aktivnega medija (slika 4.e). Tako se nekaj svetlobe odbije nazaj v medij, medtem ko ostali del preide skozi zrcalo in tvori laserski žarek (Valentinčič in sod., 2012).



Slika 4: Fizikalni princip delovanja laserskega resonatorja (Valentinčič in sod., 2012)

2.2.2 Lastnosti laserske svetlobe

Laserska svetloba ima vse običajne fizikalne lastnosti elektromagnetnega valovanja. Za uporabo laserjev so še posebej pomembne (Ready, 1997):

- monokromatičnost,
- divergenca,
- intenziteta ali jakost,
- usmerjenost žarka in
- moč.

Monokromatičnost, kot značilnost laserske svetlobe, se nanaša na to, da je žarek sestavljen iz svetlobe določene valovne dolžine. Valovne dolžine nekaterih komercialnih tipov laserjev so prikazane v preglednici 1 (Valentinčič in sod., 2012).

Preglednica 1: Valovne dolžine nekaterih komercialnih laserjev (Valentinčič in sod., 2012)

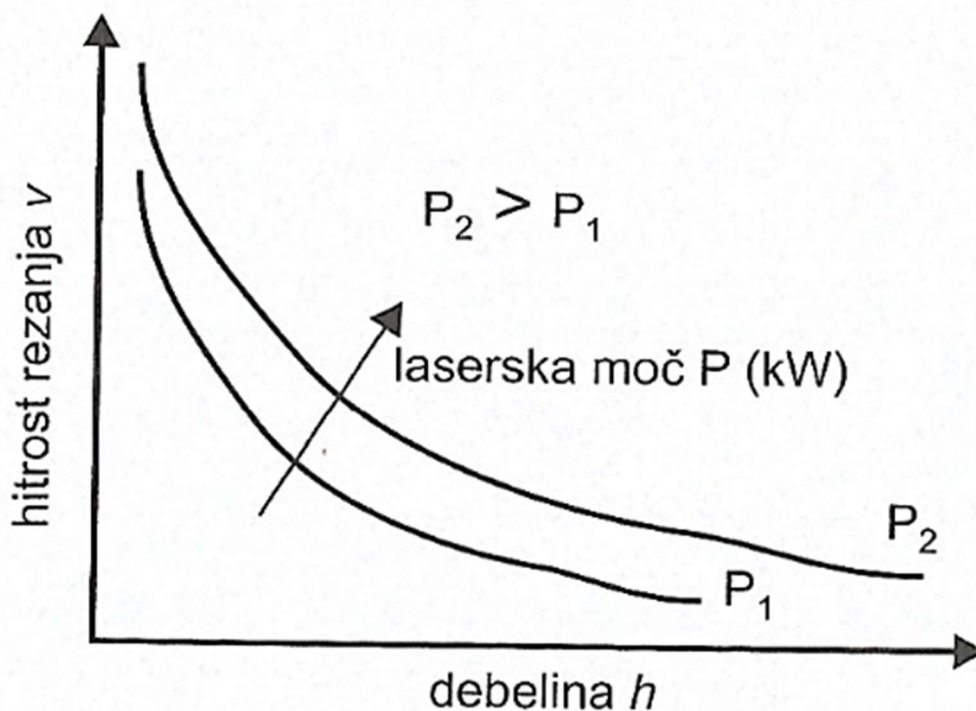
Tip laserja	Aktivni medij	Valovna dolžina (μm)	Območje	Letnica odkritja
Excimer	F ₂	0,157	UV	1975
	ArF	0,193	UV	
	KrF	0,248	UV	
Helij – Neon	Ne	0,6328	Rdeče	1962
Nd: YAG	Nd ³⁺	1,064	IR	1964
CO ₂	Ogljikov dioksid	10,64	IR	1964

Divergenca oziroma razširjanje žarka, je kot, pod katerim se širi svetlobni žarek. Divergentni kot laserskega snopa, ko zapusti resonator, je minimalen, ni pa enak nič. Majhen divergentni kot snopa pomeni, da je zbiranje svetlobe enostavno, tudi pri razmeroma velikih oddaljenostih od izvora svetlobe. Povprečni kot pod katerim se laserski žarek širi znaša približno 1 mrad, kar pomeni, da se na razdalji 1 km curek razširi na 1 m (Ready, 1997). Pri CO₂ laserju premera 20 mm znaša divergenca 10 mm, na razdalji 10 m od laserskega izvora (Valentinčič in sod., 2012).

Laserji lahko delujejo kontinuirano ali v pulzih, v kombinaciji z različnimi plini, kar pri običajnih svetlobnih virih ni mogoče. Tako delovanje skoncentrira izredno kratke pulze laserske svetlobe v območju nekaj nanometrov in tudi manj. Najnovejši stroji zagotavljajo femtosekundne pulze (10^{-15}) (Valentinčič in sod., 2012).

Moč je prva, glavna in najenostavnejša značilnost določenega laserskega sistema. Laserski sistemi z manjšo močjo bodo za opravljanje določene operacije praviloma potrebovali dalj časa. Običajno večje moči laserjev pomenijo večje rezalne hitrosti, s tem pa zmanjšajo izdelovalni časi. Ob uporabi večje moči se stroški dela povečajo. Moči laserjev, ki delujejo kontinuirano segajo od manj kot 1 mW, do približno 20 kW pri komercialnih in do več kot 1 MW pri posebnih vojaških laserjih (Chryssolouris, 1991). Tudi Valentinčič in sod. (2012) navajajo, da povečevanje laserske moči omogoča večje rezalne hitrosti pri enaki debelini materiala in obratno, kot je prikazano na sliki 5. Po drugi strani pa večja moč povzroči povečanje širine reza, zaradi večjega vnosa toplote poslabša kakovost površine ter povzroča

prekomerno zaokroževanje na vogalih izdelkov. Omenjene težave se do neke mere lahko krmili s pulzirajočim laserskim žarkom, s katerim se lahko bolj nadzira vnos energije v rezalno območje.



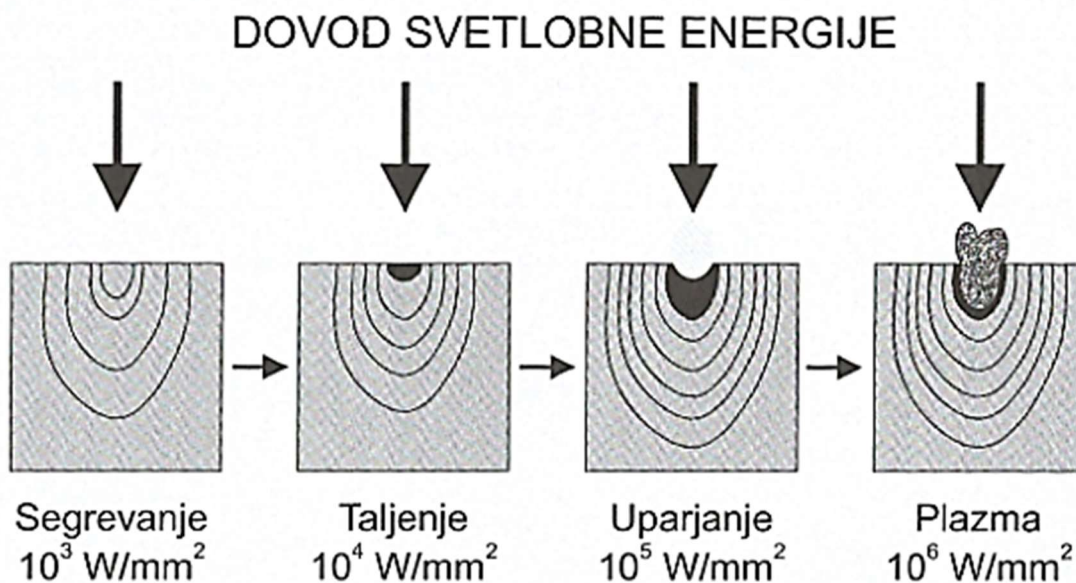
Slika 5: Odvisnost hitrosti rezanja z laserjem glede na debelino materiala in lasersko moč (Valentinčič in sod., 2012)

Večja rezalna hitrost pomeni manj časa za difuzijo toplote v material in s tem manjše toplotno vplivno področje. Prav tako je rez ožji zaradi krajšega časa vnosa energije na mesto rezanja. Rez ima konično obliko, kar pride bolj do izraza pri večjih hitrostih rezanja. Pri nižjih hitrostih rezanja nastopi prekomerno taljenje ali celo gorenje na robu reza, pri večjih hitrostih pa dosežemo nepopolno izpihovanje taline (Valentinčič in sod., 2012). Pri laserskem rezanju je tako zelo pomembno določiti optimalno hitrost rezanja glede na vrsto in debelino materiala in ravno to je cilj naše diplomske naloge.

2.2.3 Interakcija laserske svetlobe s snovjo

Del laserske svetlobe, ki pade na površino obdelovanca se odbije, del pa jo obdelovanec absorbira, kar ima za posledico različne fizikalne pojave v materialu kot so: dvig temperature obdelovanca, lokalno taljenje/sežiganje, uparjanje in nastanek plazme, kot je prikazano na sliki 6. Našteto lahko z ustrezno manipulacijo delovnih parametrov uporabljamo v tehnološke namene za termično obdelavo kovin, varjenje, rezanje, luknjanje, graviranje in označevanje. V začetni fazi se svetlobna energija laserskega žarka pretvori v toplotno energijo, to se zgodi v času pod 10^{-13} s. Številne nekovine, mednje spada tudi les, režemo

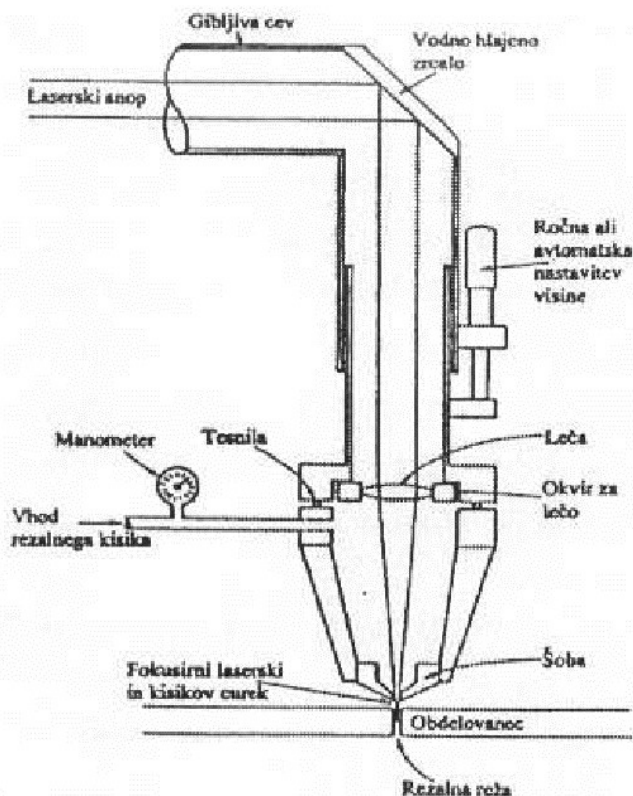
neposredno z uparjanjem snovi. Pri rezanju gorljivih snovi prihaja do ožiga in s tem nastanek zaobljenih robov (Ready, 1997).



Slika 6: Zaporedje absorpcijskih dogodkov s stopnjevanjem absorbirane moči, pri obdelovanju kovine (Valentinčič in sod., 2012)

Osnovni princip laserskega rezanja snovi je prikazan na sliki 7 in ga lahko enostavno povzamemo z naslednjimi alinejami (Powell, 1993):

- visokoenergijski žarek, ki ga omogoči laser,
- žarek je s pomočjo leč fokusiran v majhno točko na površini obdelovanca,
- fokusirani žarek segreva površino obdelovanca in povzroča lokalizirano taljenje pri kovini in termodinamsko razgradnjo (sežiganje) pri lesu, skozi celotno debelino obdelovanca,
- raztaljeni material pri kovinah izločamo s pomočjo pomožnega plina, ki ga dovajamo skozi šobo soosno z laserskim žarkom, pri rezanju lesa pa produkte zgorevanja, ki so podobni kot pri gorenju lesa, odvajamo s pomočjo odsesovanja,
- lokalizirano območje odstranjevanja materiala se pomika po površini tako, da se premika laserski žarek ali da se premika obdelovanec in tako dobimo proces rezanja obdelovalca.



Slika 7: Shematski prikaz laserskega rezanja (Powell, 1993)

Laserska obdelava materialov se vedno bolj uveljavlja predvsem zaradi naslednjih prednosti v primerjavi s klasičnimi načini obdelave (Powell, 1993):

- obdelava brez dotika med orodjem in obdelovancem,
- majhna toplotna prizadetost obdelovanca,
- široka uporaba rezanja različnih materialov, tudi različnih trdnosti materialov,
- velike rezalne hitrosti in
- delovanje z minimalnim hrupom.

Prednosti laserskega rezanja pred konvencionalnimi metodami obdelovanja materialov (mehansko, plazemsko, plinsko in rezanje z vodnim curkom) lahko povzamemo v naslednjih točkah (Powell, 1993):

- minimalna izguba materiala,
- minimalna priprava obdelovanca,
- ni obrabe in zamenjave orodij,
- zelo kvalitetni robovi tudi pri visokih rezalnih hitrostih,
- celotna temperaturna obremenitev obdelovanca je majhna,
- ni mehanske obremenitve površine,
- minimalne količine odpadkov,
- možne so zapletene oblike rezanja,
- možno je rezati predhodno utrjene materiale,
- rezati lahko začnemo kjerkoli na obdelovancu,
- proces je v celoti krmiljen računalniško ter
- večja varnost pri delu.

2.2.4 Vrste laserjev

Laserji se delijo glede na vrsto aktivnega medija, saj je od tega odvisna valovna dolžina laserske svetlobe, in sicer na plinske, trdninske, polprevodniške in barvilne laserje (Valentinčič in sod., 2012).

Plinski laserji so laserji, ki uporabljajo kot aktivno lasersko snov, plinsko snov. Njihova uporaba v lesni industriji je zelo pogosta (Eltawahni in sod., 2013).

Plinski laserji se razdelijo po naslednjem ključu (Ready, 1997):

- nevtralne plinske laserje (helij – neon laser),
- ionske plinske laserje (argon laser),
- molekulske plinske laserje (ogljikov dioksid),
- ekscimerne laserje (kriptov fluorid) in
- laserje na kovinske pare (bakrovi pari).

Njihove poglavitne prednosti pred drugimi vrstami laserjev so, da:

- je lahko prostornina aktivnega materiala velika,
- je snov relativno poceni,
- ni nobene možnosti poškodbe aktivne snovi,
- je snov homogena,
- lahko toploto enostavno oddajamo s pretakanjem plina iz območja laserskega delovanja ter
- ima visoke izhodne moči.

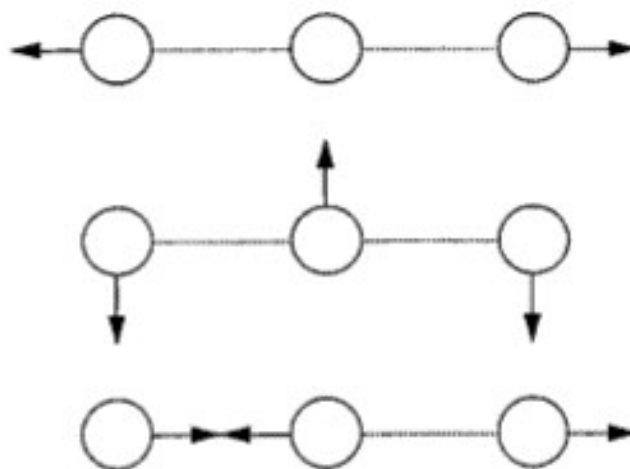
Podrobneje bomo opisali le vrsto laserja, ki smo ga uporabljali pri izdelavi diplomske naloge, in sicer smo za laserski razrez pri raziskovalni nalogi uporabili CO₂ – laser, na katerega se bomo osredotočili v naslednji točki.

2.2.5 CO₂ laser

CO₂ laserji kot aktivni medij uporabljajo mešanico plinov ogljikovega dioksida (CO₂), dušika in helija, kljub temu jih splošno imenujemo CO₂ laserji.

Princip delovanja CO₂ laserja izkorišča energijska stanja, ki so značilna za prehode elektronov iz enega energetskega stanja v atomu oziroma ionu na drugo možno energijsko stanje oziroma v primeru CO₂ laserja gre za nihajna in rotacijska stanja molekule. Po zakonih kvantne mehanike sta nihajna in rotacijska energija kvantizirani, zato obstaja spekter odgovarjajočih diskretnih energijskih stanj. V primeru, ko pride do obrnjene zasedbe med nihajnimi in rotacijskimi energetskimi stanji, lahko nastane laserska svetloba.

Molekula CO₂ je linearna molekula s tremi atomi, kjer je v sredi atom ogljik, na vsaki strani pa atoma kisika. Načine nihanja atomov CO₂ molekule smo prikazali na sliki 8.

Slika 8: Prikaz nihanja atomov pri CO₂ laserjih (Ready, 1997)

Puščice prikazujejo trenutni odmik atomov iz njihovih leg, ki so označene s krogi. Pri prvem prikazu nihanja ogljikov atom miruje, kisikova atoma pa se gibljeta v nasprotnih si smereh vzdolž vertikale. Pri drugem prikazu, je gibanje podobno prepogibanju, kjer se vsi atomi gibajo v določeni ravnini, pravokotno na simetralo, ogljikov atom se giblje v eni smeri, kisikova pa v nasprotni smeri. Zadnji prikaz pa je asimetričen. V vsakem trenutku se ogljikov atom giblje v nasprotni smeri od kisikovih atomov. Energija, ki je povezana z različnimi načini nihanja je kvantizirana (Ready, 1997).

CO₂ laserski žarek je, v primeru laserskega razreza lesa, skoraj v popolnosti absorbiran in opravi kvaliteten rez, kar je razlog uporabe tovrstnega laserja v raziskavah v lesni industriji. Še več, za razrez večine materialov nekovinskega izvora se lahko zaradi visoke absorptivnosti CO₂ in valovne dolžine, ki je 10,6 μm uporablja CO₂ laser (Eltawahni in sod., 2013). Ready (1997) pa definira še relativno visoki izkoristek spremembe električne energije v optično energijo (10-30 %) v primerjavi z drugimi laserji (0,1-3 %). CO₂ laserji lahko delujejo kontinuirano, kakor tudi impulzno. Odlikujejo jih različne izhodne moči (50-45000 W).

Pri eksperimentalnem delu naše diplomske naloge, za rezanje furnirnih vezanih plošč, smo uporabili CO₂ lasersko gravirni stroj Glaser JQ 9060, ki je prikazan na sliki 12.

2.3 LASERSKI RAZREZ VEZANE PLOŠČE

Velik odstotek nekovinskih materialov, kamor prištevamo tudi les, ima povečane lastnosti absorpcije. Iz tega izhajajoč je bila prva znana komercialna uporaba CO₂ laserja za rezanje utorov v matrične šablone iz vezanega lesa (Powell, 1993; Barcikowski in sod., 2006). Uporaba laserskega reza v lesni industriji se je v raziskovalne namene začela v 1970. letih. Raziskovalci so izpostavili pglavitne prednosti uporabe laserskega reza: visoka preciznost reza, nična obraba stroja, nizek hrup ob obratovanju ter ozka linija reza (Li in sod., 2016).

Preglednica 2 prikazuje optimalne parametre rezanja lesa in lesnih kompozitov s CO₂ laserjem (Powell, 1993).

Preglednica 2: Optimalni parametri za rezanje lesa in lesnih kompozitov s CO₂ laserjem (Powell, 1993)

material	debelina (mm)	rezalna hitrost (m/min)	moč (W)
Daglaška jelka	10	3,5	500
Bukev	10	4	500
Hrast	10	2,9	500
Vezana plošča	6	7	1000
Vezana plošča	12	3	1000
Vezana plošča	20	1,5	1000
MDF	6	9	1000
MDF	12	4	1000
MDF	20	2	1000
Iverna plošča	3	10	500
Iverna plošča	4	7	500

Temperature v coni rezanja so med 2000-3000 °C, odvisno od gostote materiala. Rezalne hitrosti so odvisne od laserske moči in od lastnosti materiala (debelina obdelovanca, količina vode na enoto volumna in količina zraka na enoto volumna). Debelina obdelovanca zelo vpliva na učinkovitost laserja, saj se ta z večanjem debeline niža (in obratno). Zrak, ki se nahaja v lesu ne vpliva na hitrost rezanja in ga obravnavamo kot luknje v materialu. Voda pa, v primeru laserskega razreza s CO₂ laserjem, med procesom rezanja izpari, kar zmanjšuje hitrost rezanja. Prav zaradi velikega vpliva vode, je preglednico optimalnih rezalnih hitrosti posamezne vrste lesa težko sestaviti.

Leseni kompoziti, kamor spadajo vezan les, iverne in vlaknene plošče ..., so veliko bolj homogeni kot les v svoji naravni obliki. Iz tega izhajajoč so rezalne hitrosti večje in kvaliteta rezanja je boljša. Ugotovljeno je tudi, da na rezalno hitrost rezanja lesnih kompozitov zelo vpliva tudi vrsta uporabljenega lepila (Eltawahni in sod., 2011 in 2013).

Lesne kompozite, ki so zlepljeni z urea-formaldehidnim lepilom, lahko režemo z do trikrat večjo rezalno hitrostjo, kot tiste, ki so zlepljeni s fenol-formaldehidnim lepilom (Chrysolouris, 1991).

Li in sod. (2016) povzemajo predhodne raziskave, ki so prikazale povezave med obratovalnimi parametri (kot so moč laserja, hitrost reza, zračni pritisk in fokalna točka) in karakteristikami CO₂ laserskega razreza. Vsebnost vode, specifična gostota, smer reza in debelina lesnega obdelovanca imajo velik vpliv na hitrost laserskega reza. Prava kombinacija naštetih parametrov dosega visoko kvaliteten produkt z nizkimi obratovalnimi stroški.

3 MATERIAL IN METODE

3.1 MATERIALI

3.1.1 Furnirna vezana plošča

Za izvajanje poizkusov smo uporabili topolovo furnirno vezano ploščo, zlepljeno z urea-formaldehidnim lepilom, namenjeno za notranjo uporabo, treh različnih debelin (10 mm, 5 mm in 4 mm):

- Petslojna topolova furnirna vezana plošča debeline 10 mm (dejansko 9,93 mm). Debelina posameznih slojev furnirja je označena na sliki 9.



Slika 9: Prerez topolove furnirne vezane plošče nazivne debeline 10 mm (osebni arhiv, julij 2016)

- Trislojna topolova furnirna vezana plošča debeline 5 mm (dejansko 5,20 mm). Debelina posameznih slojev furnirja je označena na sliki 10.



Slika 10: Prerez topolove furnirne vezane plošče nazivne debeline 5 mm (osebni arhiv, julij 2016)

- Trislojna topolova furnirna vezana plošča debeline 4 mm (dejansko 3,80 mm). Debelina posameznih slojev furnirja je označena na sliki 11.



Slika 11: Prerez topolove furnirne vezane plošče nazivne debeline 4 mm (osebni arhiv, julij 2016)

Iz furnirne vezane plošče smo izžagali preizkušance velikosti približno 400 mm × 150 mm, v katere smo z laserjem zarezovali zareze z različno nastavljenimi parametri stroja.

3.1.2 Označevanje preizkušancev

Pred razžagovanjem preizkušanca na manjše lamele je bilo potrebno vsako lamelo posebej označiti, da ne bi prišlo do neželenih zamenjav. Na vsako lamelo smo s kemičnim svinčnikom zapisali pod kakšnimi pogoji so bili rezi z laserskim žarkom izdelani (moč laserskega žarka in hitrost rezanja).

3.1.3 Laser

Za razrez topolove furnirne vezane plošče smo uporabili lasersko gravirni stroj Glaser JQ 9060, ki ga uvrščamo v skupino CO₂ laserjev.

Njegove osnovne karakteristike so:

Preglednica 3: Podatki o uporabljenem stroju za laserski razrez vezane plošče

tip	CO ₂ plinski laser
napajanje	AC 230 V
moč laserja	80 W
delovno področje	900 mm × 600 mm
največja debelina obdelovanca	400 mm
delovna miza	električno pomična
hlajenje	vodno z varnostnim sistemom
natančnost	± 0,01 mm
hitrost rezanja	0 – 400 mm/s
Hitrost graviranja	0 – 1000 mm/s
mere stroja (š × v × g)	1405 mm × 1015 mm × 1090 mm



Slika 12: Fotografija CO₂ laserja, uporabljenega pri razrezu furnirnih vezanih plošč (osebni arhiv, maj 2016)

3.2 METODE RAZISKAVE

3.2.1 Metoda razrezovanja furnirne vezane plošče

Raziskava je pri razrezovanju topolove furnirne vezane plošče temeljila na spreminjanju treh parametrov, in sicer debeline vezane plošče, moči laserskega žarka in hitrosti rezanja.

Maksimalna moč danega laserskega žarka znaša 80 W. Dolgotrajno delovanje laserskega žarka na maksimalni moči z vidika življenjske dobe aparata ni zaželeno, zato smo raziskavo smiselno omejili na tri zmanjšane moči laserskega žarka in sicer na 20 W, kar znaša 25 % maksimalne moči, 40 W, kar znaša 50 % maksimalne moči in na 60 W, kar znaša 75 % maksimalne moči laserskega žarka.

Iz vseh treh debelin (10 mm, 5 mm in 4 mm) topolove furnirne vezane plošče smo najprej našagali po tri preizkušance velikosti približno 400 mm × 150 mm, kar skupno znaša devet preizkušancev.

V preizkušance smo z laserskim žarkom izdelali 10 vzporednih rezov v dolžini 50 mm, za vsako nastavljeno hitrost. Na enem preizkušancu je bila nastavljena samo ena moč laserskega žarka, spreminjali smo zgolj hitrost rezanja. Hitrost smo spreminjali glede na debelino vezane plošče in glede na nastavljeno moč laserskega žarka, na šest različnih stopenj. Na enem preizkušancu je torej nastalo šestkrat po deset rezov z isto močjo laserskega žarka, spreminjala se je samo hitrost rezanja (preglednica 4).

Preglednica 4: Testirane kombinacije treh parametrov razreza furnirne vezane plošče z laserjem

Debelina VP	Moč laserskega žarka	1. Hitrost rezanja [mm/s]	2. Hitrost rezanja [mm/s]	3. Hitrost rezanja [mm/s]	4. Hitrost rezanja [mm/s]	5. Hitrost rezanja [mm/s]	6. Hitrost rezanja [mm/s]
10 mm	20 W	6	8	10	12	14	16
	40 W	6	8	10	12	14	16
	60 W	6	8	10	12	14	16
5 mm	20 W	8	12	16	20	24	28
	40 W	16	20	24	28	32	36
	60 W	16	20	24	28	32	36
4 mm	20 W	16	20	24	28	32	36
	40 W	36	40	44	48	52	56
	60 W	36	40	44	48	52	56

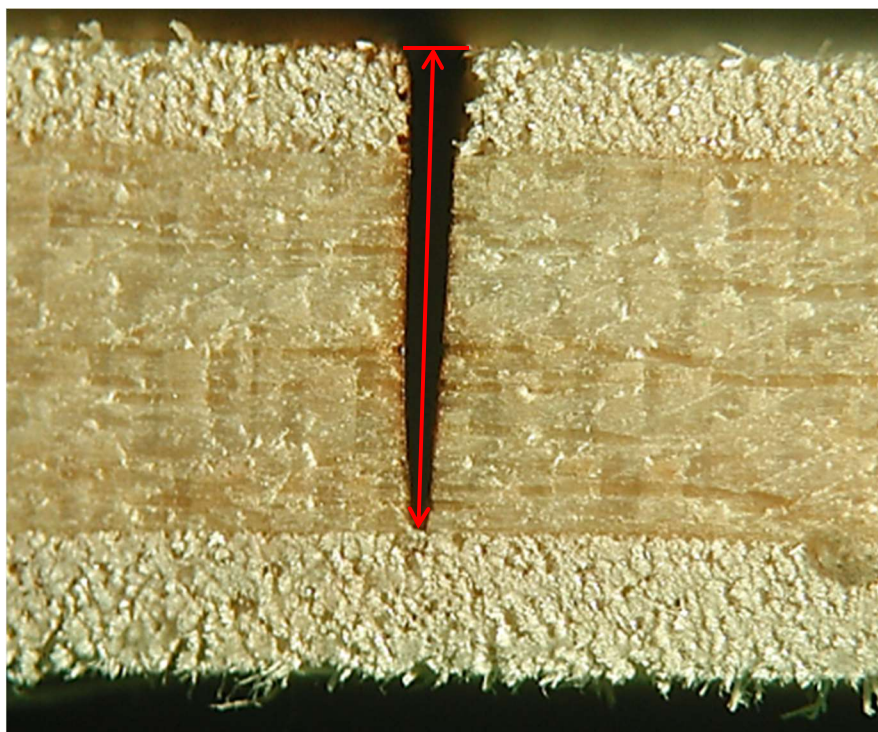
Zaradi goriščne razdalje leče (položaj fokusa), je bilo potrebno na stroju višino mize nastavljati za vsako raziskovano debelino posebej. Fokus je bil vedno nastavljen s pomočjo šablone, na površino plošče.



Slika 13: Izdelane zareze v preizkušanece nazivne debeline 5 mm pri 40 W moči laserskega žarka, (povečevanje hitrosti rezanja od leve proti desni) (osebni arhiv, julij 2016)

3.2.2 Merjenje globine reza

Preizkušance smo na formatnem krožnem žagalnem stroju razžagali na manjše lamele, v smeri pravokotno na laserske reze. Vsako zarezo posebej smo nato iz čela vezane plošče poslikali na mikroskopu znamke Olympus, tip SZX12, z $11,2\times$ povečavo za vezano ploščo nazivne debeline 10 mm in z $20\times$ povečavo za vezano ploščo nazivne debeline 5 mm in 4 mm.



Slika 14: Slika laserskega reza v vezani plošči, posneta na mikroskopu in prikaz merjenja globine reza (osebni arhiv, maj 2016)

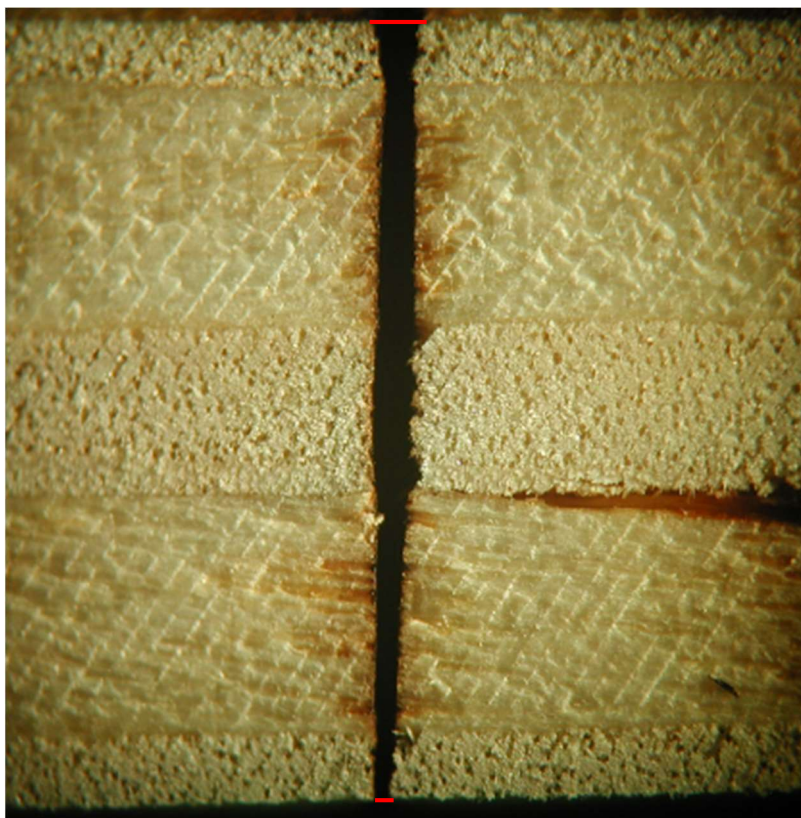


Slika 15: Mikroskop s pomočjo katerega smo poslikali laserske reze v vezani plošči (osebni arhiv, maj 2016)

Vse slike, skupaj jih je bilo 540, smo nato analizirali z računalniškim programom Digimizer (izmerili globino reza - slika 14), iz katerega smo podatke prenesli v računalniški program Excel in jih za lažje analiziranje, prikazali v grafični obliki.

3.2.3 Merjenje širine reza

S pomočjo računalniškega programa Digimizer smo analizirali vsako sliko laserskega reza, posneto s pomočjo mikroskopa in z nje pridobili podatke o širini laserskega reza na zgornji (vstop laserja) in na spodnji strani vezane plošče (izstop laserja). Podatke smo nato prenesli v program Excel in jih za lažje analiziranje prikazali v grafični obliki.



Slika 16: Slika laserskega reza v vezani plošči, posneta na mikroskopu in prikaz merjenja širine reza (osebni arhiv, julij 2016)

3.2.4 Računanje koničnosti reza

Iz izmerjenih podatkov o globini in o širini reza laserskega žarka na zgornji (vstop laserja) in na spodnji strani (izstop laserja) furnirne vezane plošče smo izračunali koničnost reza.

a ... širina reza laserskega žarka na zgornji strani VP (mm)

b ... širina reza laserskega žarka na spodnji strani VP (mm)

c ... globina reza (mm)

α ... koničnost reza ($^{\circ}$)

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{(a-b)}{2 \times c} \quad \dots(1)$$

Ravni rezi (pod kotom 90° glede na zgornjo in spodnjo ploskev) so z vidika nadaljnje obdelave zelo pomembni. Večja kot je koničnost, večje bodo reže ob stiku s sosednjim elementom, kar ni želen pojav.

3.2.5 Računanje ločilne energije

Iz izmerjenih podatkov o globini reza laserskega žarka in z nastavljenimi parametri rezanja (moč laserskega žarka in hitrost rezanja) smo izračunali ločilno energijo.

Predpostavljamo, da sta si hitrost rezanja v in globina reza c v obratnem sorazmerju, njun produkt pa je premo sorazmeren z močjo laserskega žarka P . Ločilna energija E je torej kvocient moči laserskega žarka P in produkta globine c in hitrosti rezanja v in podaja vrednost, ki jo potrebujemo, da snov ločimo (prerežemo).

P ... moč (W)

v ... hitrost (mm/s)

c ... globina reza (mm)

E ... ločilna energija (J/mm²)

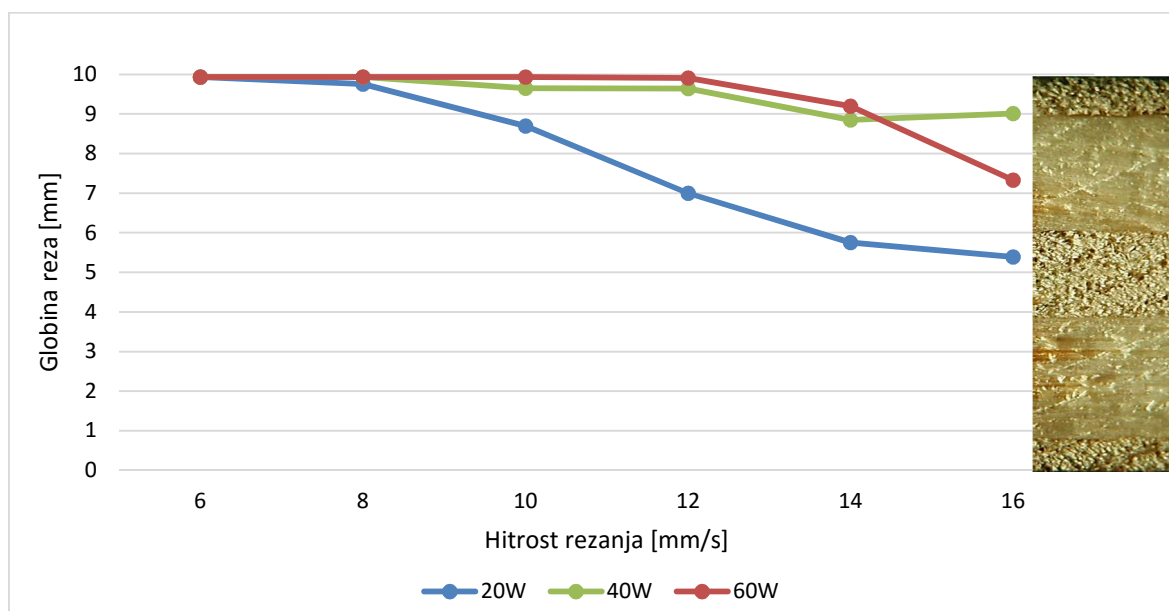
$$E = \frac{P}{(c \times v)} \quad \dots(2)$$

4 REZULTATI

4.1 GLOBINA REZA

4.1.1 Merjenje globine reza na vezani plošči nazivne debeline 10 mm

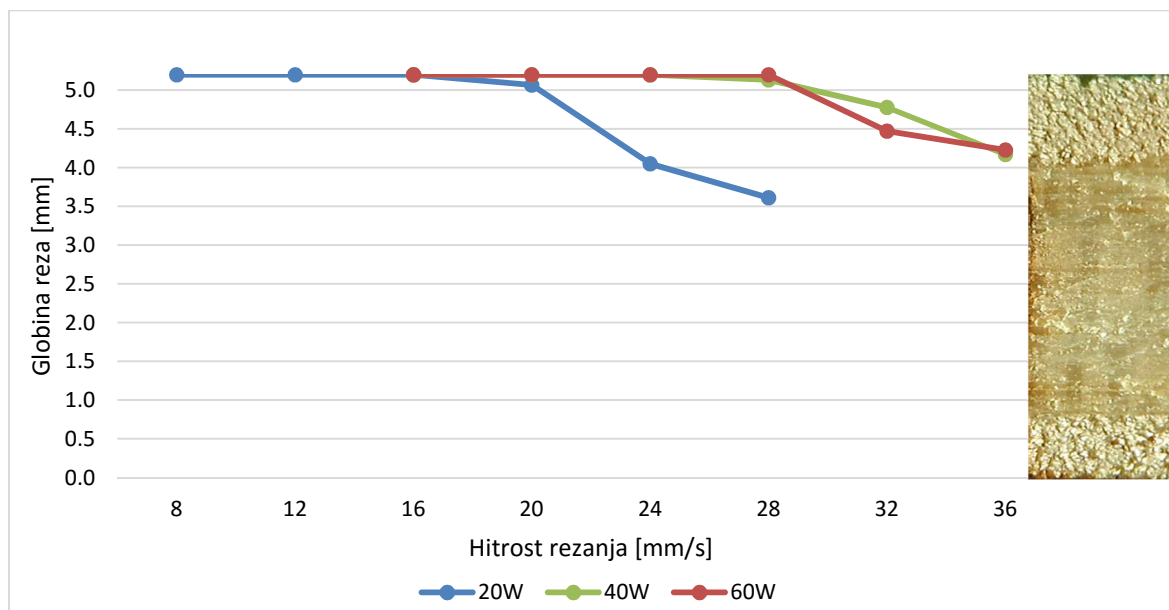
Na sliki 17 smo za tri različne moči laserja (20 W, 40 W in 60 W) prikazali povprečne izmerjene globine reza v odvisnosti od hitrosti rezanja. Slika za lažjo predstavbo vsebuje tudi pogled prereza VP10. Iz slike je razvidno, da je pri moči laserja 60 W, VP10 popolnoma prerezana pri treh različnih hitrostih, medtem ko je pri moči laserja 40 W, VP10 popolnoma prerezana le pri dveh hitrostih. Pri moči laserja 20 W je VP10 prerezana samo pri najpočasnejši hitrosti (6 mm/s).



Slika 17: VP10; Povprečna globina reza v odvisnosti od hitrosti rezanja pri različnih močeh laserja

4.1.2 Merjenje globine reza na vezani plošči nazivne debeline 5 mm

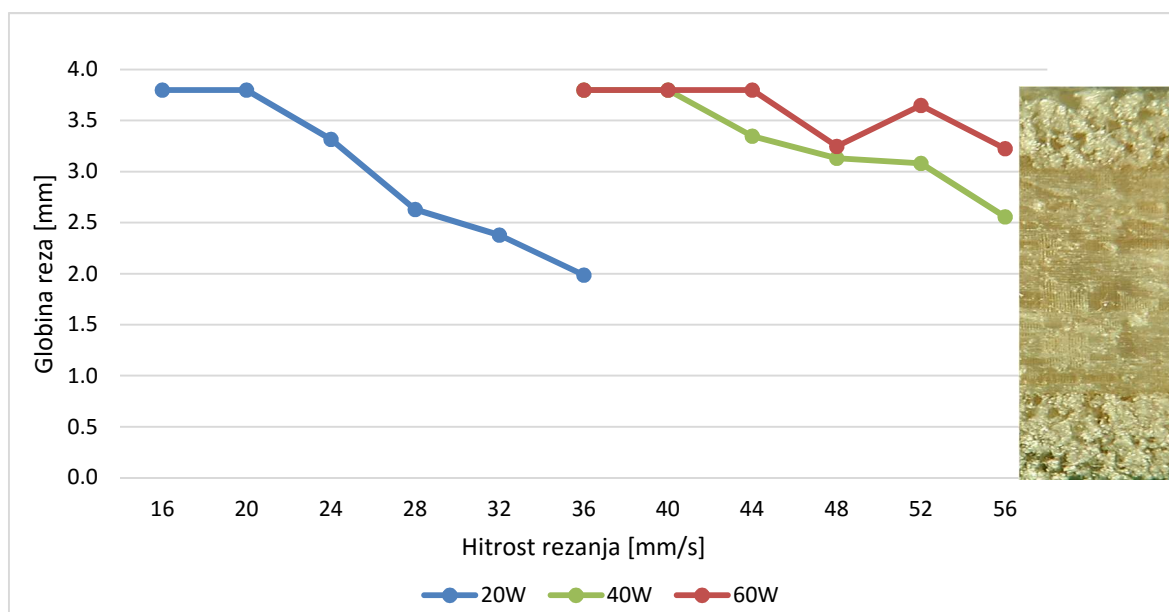
Na sliki 18 smo za tri različne moči laserja (20 W, 40 W in 60 W) prikazali povprečne izmerjene globine reza v odvisnosti od hitrosti rezanja. Slika za lažjo predstavbo vsebuje tudi pogled prereza VP5. Iz slike je razvidno, da je pri moči laserja 60 W, VP5 popolnoma prerezana pri štirih različnih hitrostih, medtem ko je pri moči laserja 40 W in 20 W, VP5 popolnoma prerezana pri treh hitrostih. Iz slike 18 je razvidno, da se naklon nizov na spojih nekoliko zmanjša, kar kaže na dejstvo, da spoji furnirnih listov vplivajo na globino rezanja.



Slika 18: VP5; Povprečna globina reza v odvisnosti od hitrosti rezanja pri različnih močeh laserja

4.1.3 Merjenje globine reza na vezani plošči nazivne debeline 4 mm

Na sliki 19 smo za tri različne moči laserja (20 W, 40 W in 60 W) prikazali povprečne izmerjene globine reza v odvisnosti od hitrosti rezanja. Slika za lažjo predstavbo vsebuje tudi pogled prereza VP4. Iz slike je razvidno, da je pri moči laserja 60 W, VP4 popolnoma prerezana pri treh različnih hitrostih, medtem ko je pri moči laserja 40 W in 20 W, VP4 popolnoma prerezana pri dveh hitrostih. Pri pregledu slike 19 vidimo odstopanje rezultata meritve globine reza pri moči laserskega žarka 60 W in hitrosti 48 mm/s, kar nakazuje na dejstvo, da je les nehomogen material.



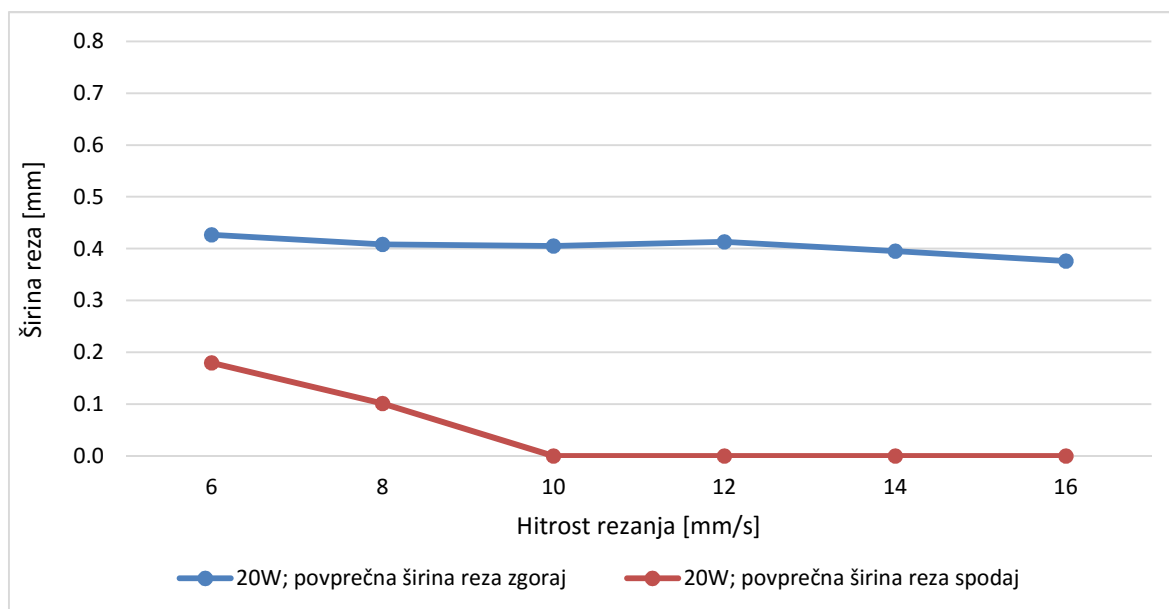
Slika 19: VP4; Povprečna globina reza v odvisnosti od hitrosti rezanja pri različnih močeh laserja

4.2 ŠIRINA REZA

4.2.1 Merjenje širine reza na vezani plošči nazivne debeline 10 mm

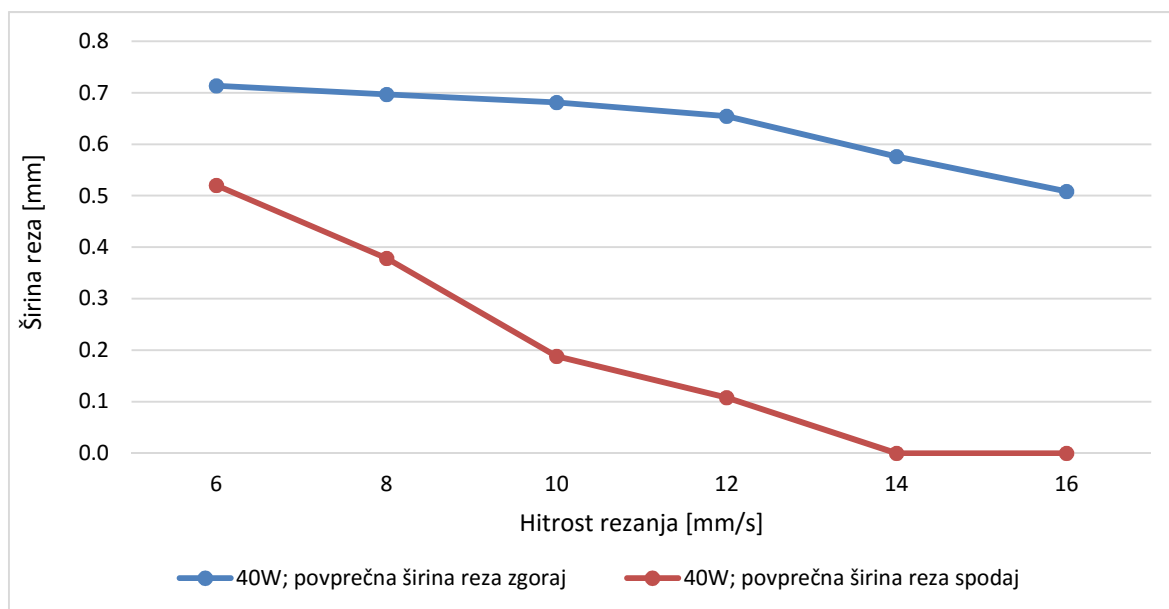
Slike 20, 21 in 22 prikazujejo povprečne rezultate meritev širine reza na zgornji (vstopni strani laserskega žarka – na slikah modra povezovalna linija) in spodnji (izstopni strani laserskega žarka – na slikah rdeča povezovalna linija) strani preizkušancev VP10, pri različnih hitrostih rezanja in pri različnih močeh laserskega žarka.

Slika 20 prikazuje, da se pri konstantni moči 20 W in spreminjanju hitrosti rezanja, širina reza na vstopni strani laserskega žarka zanemarljivo spreminja, med tem ko se na izstopni strani laserskega žarka širina reza s povečevanjem hitrosti rezanja manjša, oziroma laserski žarek sploh ne izstopi iz obdelovanca (ga ne prereže). To se zgodi pri hitrosti rezanja 10 mm/s in naprej.



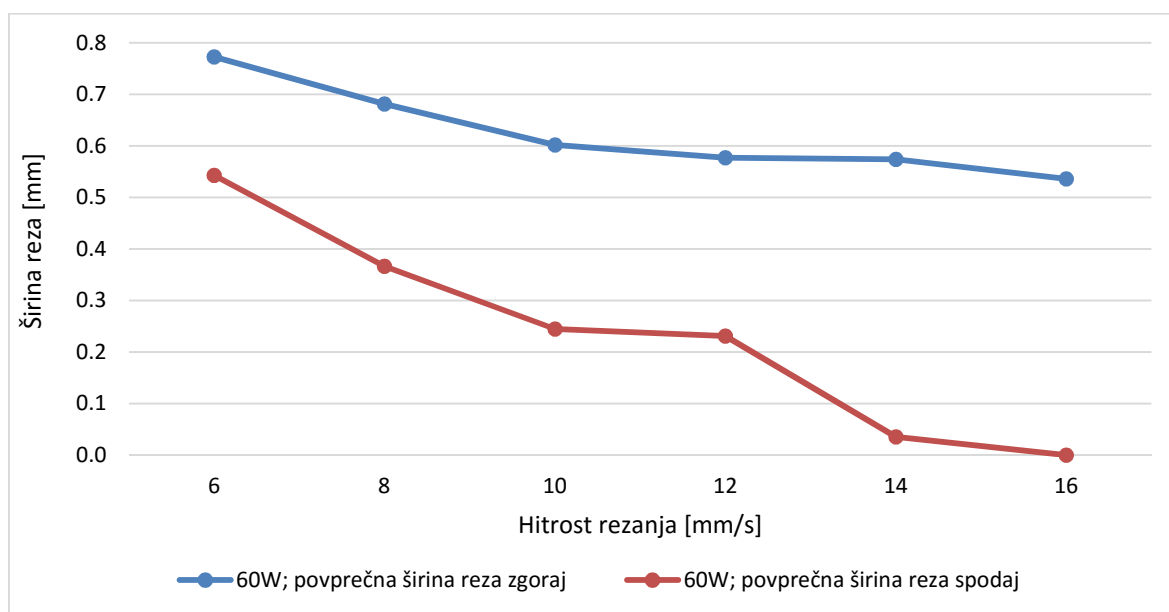
Slika 20: VP10; Povprečna širina reza zgoraj in spodaj v odvisnosti od hitrosti rezanja pri moči laserja 20W

Na sliki 21 prikazujemo, da se pri konstantni moči laserskega žarka 40 W in ob povečevanju hitrosti reza, širina reza na vstopni strani laserskega žarka skoraj linearno rahlo zmanjšuje, na izstopni strani laserskega žarka pa se širina reza s povečevanjem hitrosti rezanja strmo manjša.



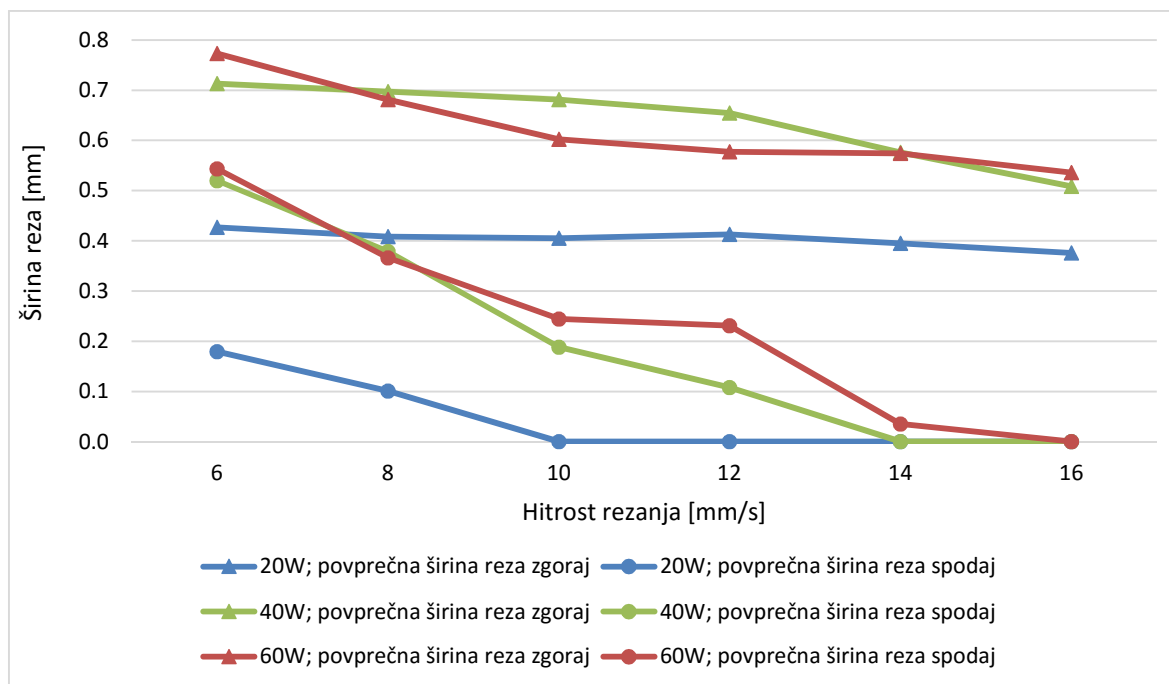
Slika 21: VP10; Povprečna širina reza zgoraj in spodaj v odvisnosti od hitrosti rezanja pri moči laserja 40W

Rezultati na sliki 22 prikazujejo povprečne izmerjene širine reza, v preizkušane VP10, na vstopni in izstopni strani laserskega žarka, z močjo 60 W. Iz slike razberemo, da se širina reza na obeh straneh VP10 s povečevanjem rezalne hitrosti enakomerno zmanjšuje, do točke, kjer laserski žarek ne izstopi iz obdelovanca - to se je zgodilo pri hitrosti 16 mm/s.



Slika 22: VP10; Povprečna širina reza zgoraj in spodaj v odvisnosti od hitrosti rezanja pri moči laserja 60W

Slika 23 prikazuje združen pregled rezultatov povprečnih širin rezov v preizkušane VP10, v odvisnosti od hitrosti rezanja pri različnih močeh laserja. Iz slike razberemo, da najožje reze dosegamo pri najmanjši moči laserskega žarka (20 W). Razvidno je tudi, da se širine rezov narejene z močjo 40 W zanemarljivo razlikujejo od širin rezov narejenih z močjo 60 W.

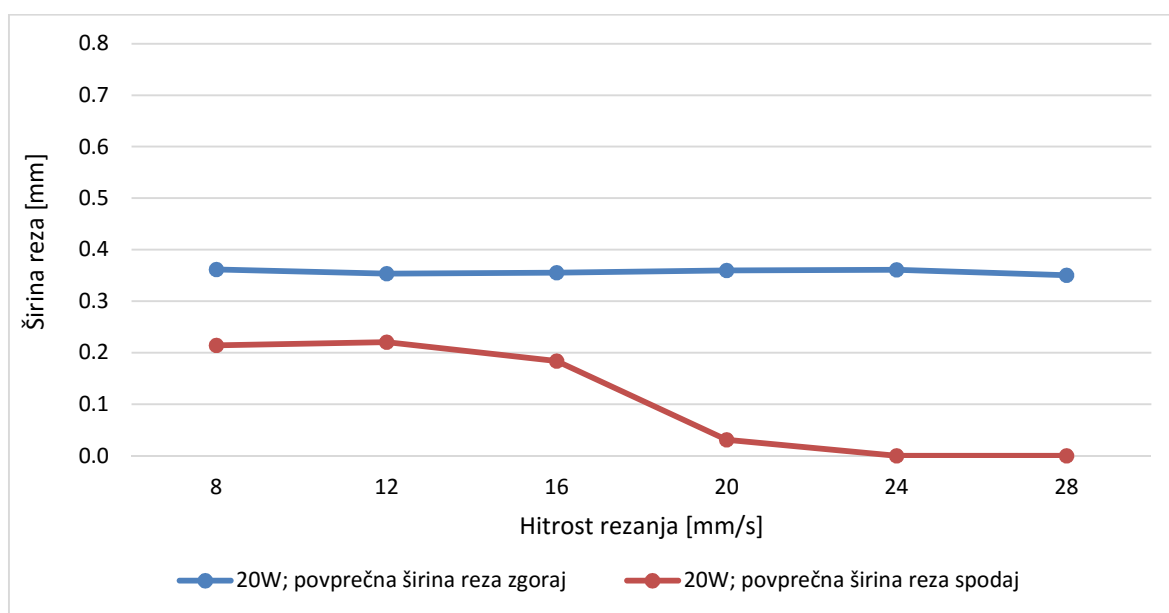


Slika 23: VP10; Povprečna širina reza zgoraj in spodaj v odvisnosti od hitrosti rezanja pri različnih močeh laserja

4.2.2 Merjenje širine reza na vezani plošči nazivne debeline 5 mm

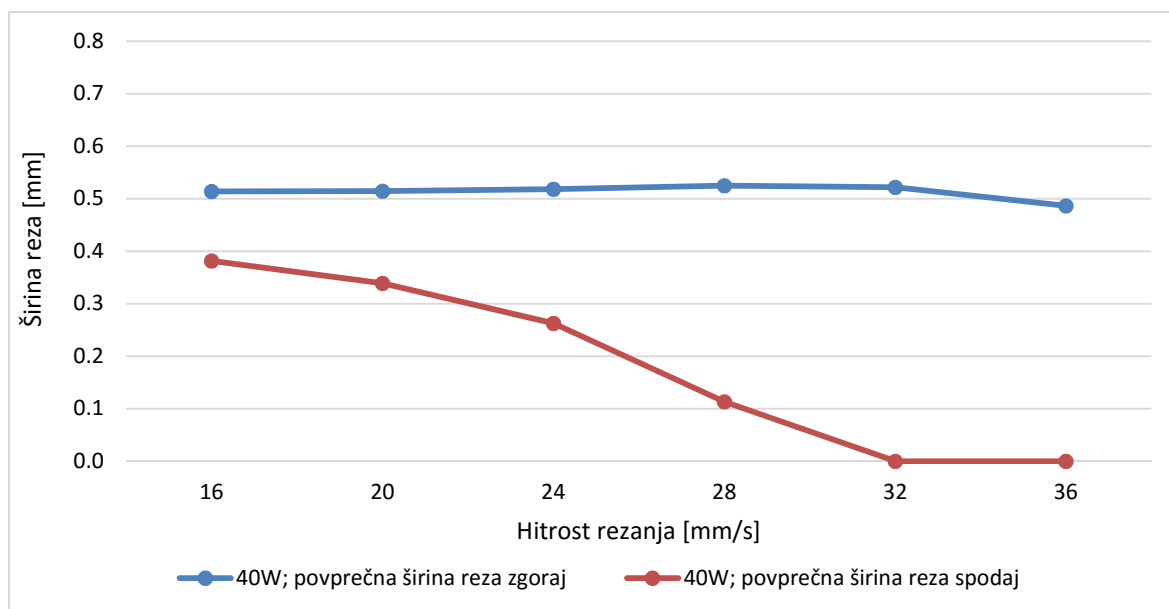
Slike 24, 25 in 26 prikazujejo povprečne rezultate meritev širine reza na zgornji (vstopni strani laserskega žarka – na slikah modra povezovalna linija) in spodnji (izstopni strani laserskega žarka – na slikah rdeča povezovalna linija) strani preizkušancev VP5, pri različnih hitrostih rezanja in pri različnih močeh laserskega žarka.

Na sliki 24 prikazujemo, da se pri konstantni moči laserskega žarka 20 W in ob povečevanju hitrosti rezanja, širina reza na zgornji, vstopni strani laserskega žarka zanemarljivo spreminja. Širina izstopnega reza pa drastično pada v območju hitrosti rezanja, kjer preizkušanci niso bili prerezani skozi celotno debelino - to se zgodi pri hitrosti rezanja 24 mm/s.



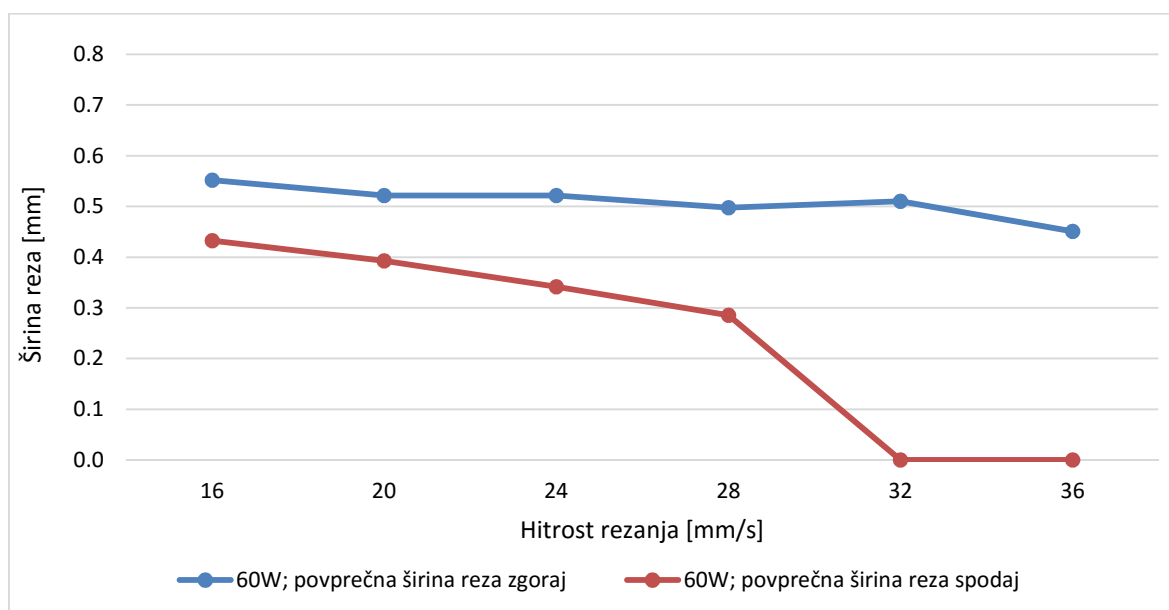
Slika 24: VP5; Povprečna širina reza zgoraj in spodaj v odvisnosti od hitrosti rezanja pri moči laserja 20W

Pri sliki 25 vidimo, da se pri konstantni moči 40 W in ob povečevanju hitrosti (od 16 mm/s do 36 mm/s), vstopna širina reza skorajda ne spreminja, med tem ko širina izstopnega reza s povečevanjem hitrosti strmo pada in pri hitrosti rezanja 32 mm/s, laserski žarek VP5 ne prereže več skozi celotno debelino.



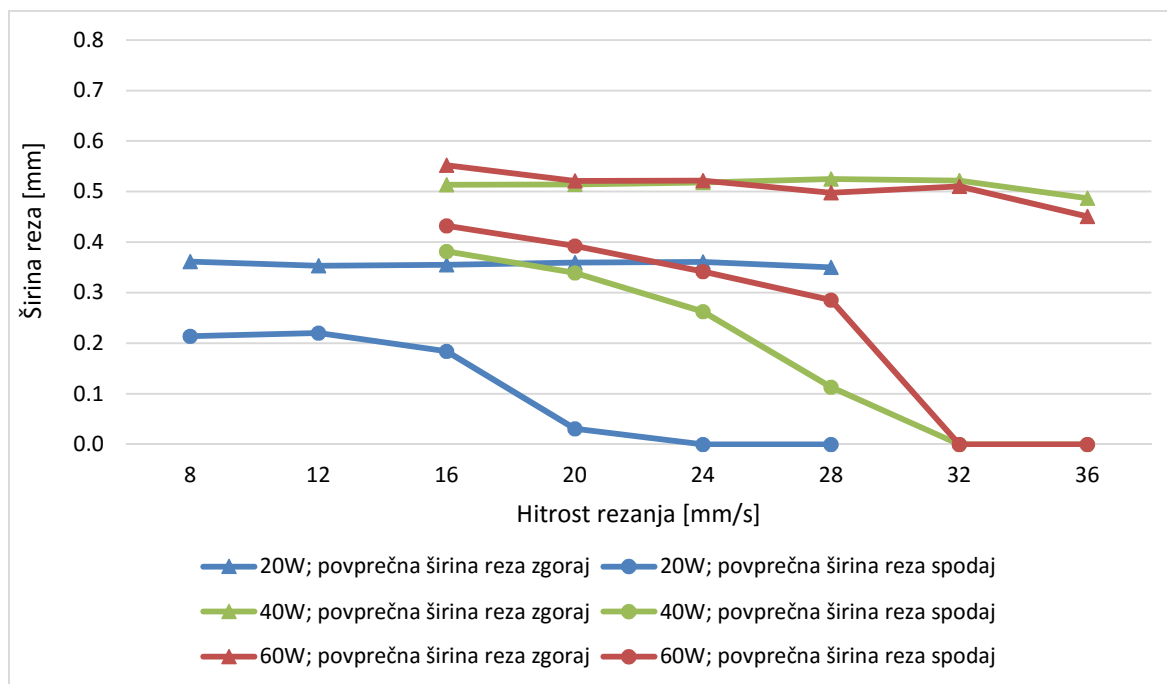
Slika 25: VP5; Povprečna širina reza zgoraj in spodaj v odvisnosti od hitrosti rezanja pri moči laserja 40W

Iz slike 26 razberemo, da se pri konstantni moči laserskega žarka 60 W in ob spreminjanju hitrosti (od 16 mm/s do 28 mm/s), širina reza na izstopni strani laserskega žarka enakomerno zmanjšuje le do hitrosti rezanja 28 mm/s, nato pa drastično pade in pri hitrosti rezanja 32 mm/s laserski žarek preizkušanca VP5 več ne prereže skozi celotno debelino.



Slika 26: VP5; Povprečna širina reza zgoraj in spodaj v odvisnosti od hitrosti rezanja pri moči laserja 60W

Na sliki 27 je prikazan združen prikaz rezultatov povprečnih širin rezov VP5, v odvisnosti od hitrosti rezanja, pri različnih močeh laserja. Razberemo, da se širina reza v odvisnosti od hitrosti rezanja zanemarljivo spreminja na vstopni stran laserskega žarka ter da se širina reza na izstopni strani laserskega žarka z večanjem hitrosti rezanja vidno zmanjšuje, kar povzroča neželeni efekt koničnosti reza.



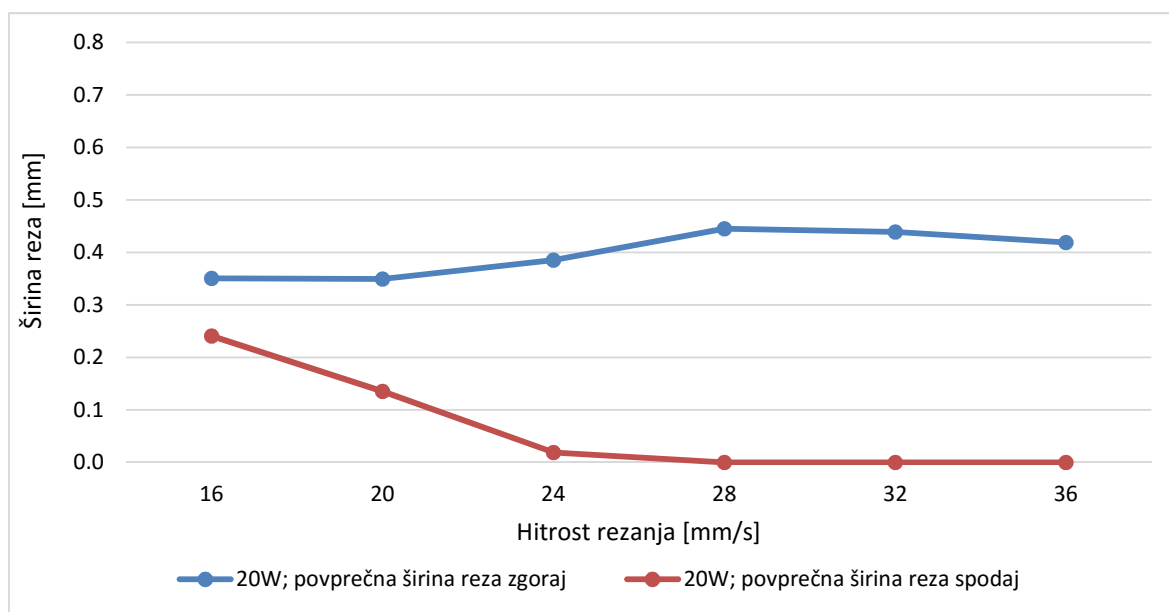
Slika 27: VP5; Povprečna širina reza zgoraj in spodaj v odvisnosti od hitrosti rezanja pri različnih močeh laserja

4.2.3 Merjenje širine reza na vezani plošči nazivne debeline 4 mm

Slike 28, 29 in 30 prikazujejo povprečne rezultate meritev širine reza na zgornji (vstopni strani laserskega žarka – na slikah modra povezovalna linija) in spodnji (izstopni strani laserskega žarka – na slikah rdeča povezovalna linija) strani preizkušancev VP4, pri različnih hitrostih rezanja in pri različnih močeh laserskega žarka.

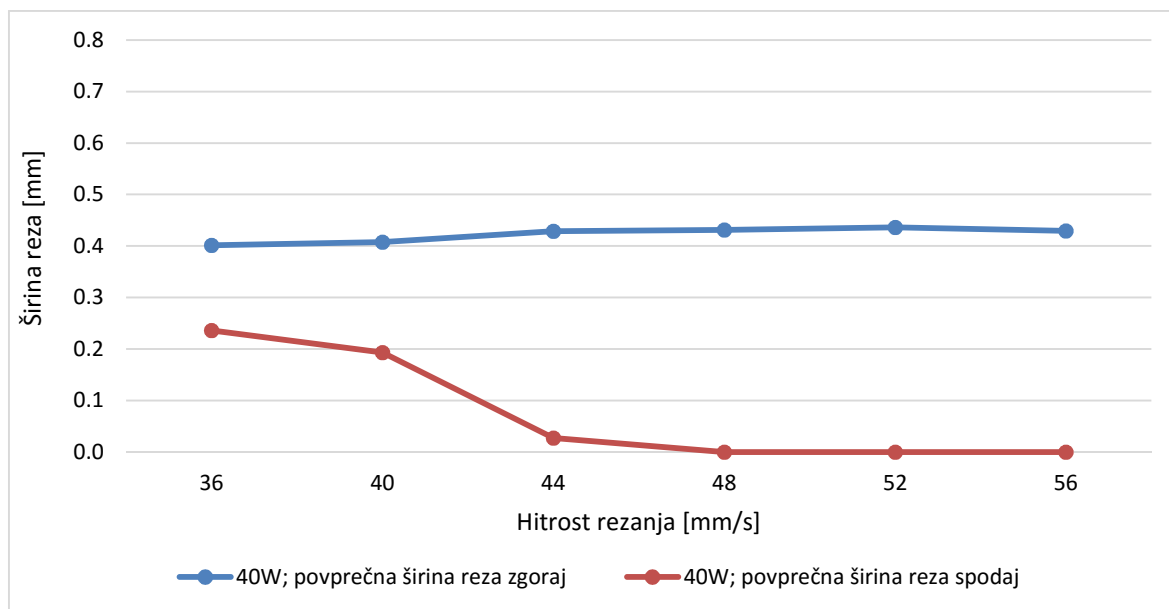
Na sliki 28 prikazujemo, da se pri konstantni moči laserskega žarka 20 W in ob povečevanju hitrosti rezanja, širina reza na zgornji, vstopni strani laserskega žarka povečuje, širina izstopnega reza pa strmo pada, kar efekt koničnosti reza še poveča.

Ko enkrat laserski žarek vezane plošče več ne prereže skozi celotno debelino, se vsa toplota in produkti sežiganja (dimni plini) odstranijo na zgornji strani, kar povzroča, da je rez bolj ožgan in posledično na zgornji strani tudi širši, kar je na sliki 28 lepo vidno.



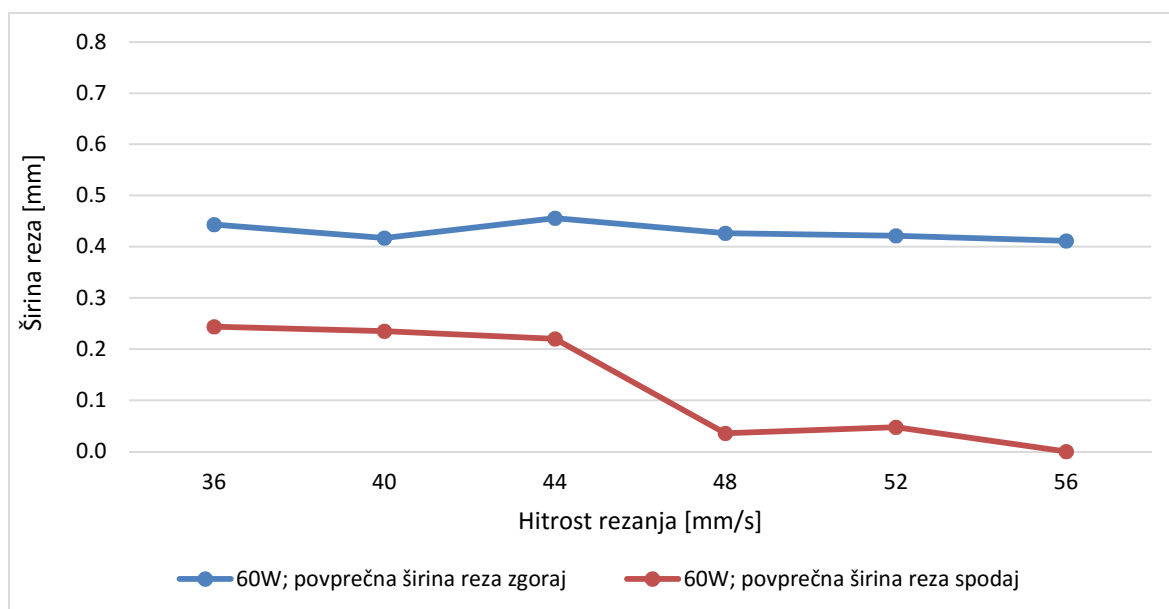
Slika 28: VP4; Povprečna širina reza zgoraj in spodaj v odvisnosti od hitrosti rezanja pri moči laserja 20W

Iz slike 29 razberemo, da se pri konstantni moči laserskega žarka 40 W in ob spreminjanju hitrosti rezanja (od 36 mm/s do 56 mm/s), širina reza na zgornji, vstopni strani laserskega žarka rahlo povečuje. Širina reza na spodnji, izstopni strani laserskega žarka pa s povečevanjem hitrosti rezanja strmo pada predvsem v območju, kjer preizkušanec VP4 ni bil več prerezan skozi celotno debelino.



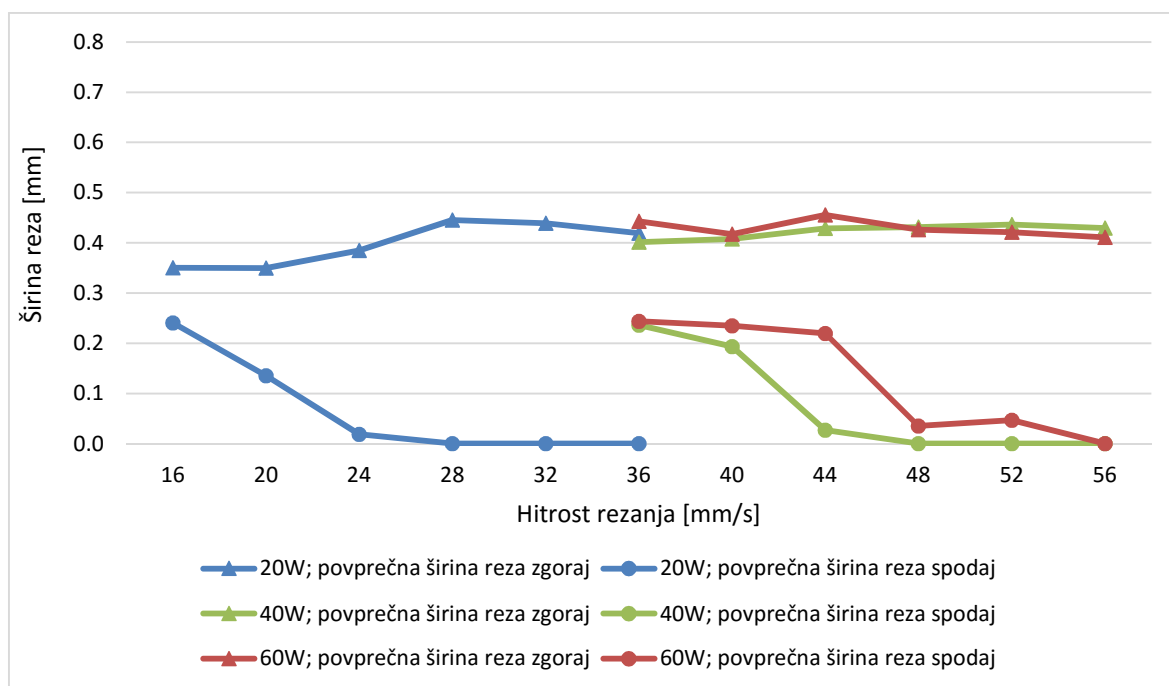
Slika 29: VP4; Povprečna širina reza zgoraj in spodaj v odvisnosti od hitrosti rezanja pri moči laserja 40W

Slika 30 prikazuje povprečne širine rezov v preizkušane VP4, v odvisnosti od hitrosti rezanja, pri konstantni moči laserskega žarka 60 W. Širina reza na zgornji strani VP4 je tekom povečevanja hitrosti rezanja skoraj enaka, povprečne vrednosti se gibljejo med 0,41 in 0,46 mm. Širina reza na spodnji strani VP4 pa se znižuje in pri hitrosti 56 mm/s laserski žarek več ne izstopi iz preizkušanca.



Slika 30: VP4; Povprečna širina reza zgoraj in spodaj v odvisnosti od hitrosti rezanja pri moči laserja 60W

Na sliki 31 je prikazan združen prikaz rezultatov povprečnih širin rezov VP4, v odvisnosti od hitrosti rezanja, pri različnih močeh laserja. Razberemo, da se širina reza v odvisnosti od hitrosti rezanja na vstopni stran laserskega žarka povečuje in da se širina reza na izstopni strani laserskega žarka, z večanjem hitrosti rezanja zmanjšuje, kar močno povzroča neželeni efekt koničnosti reza.

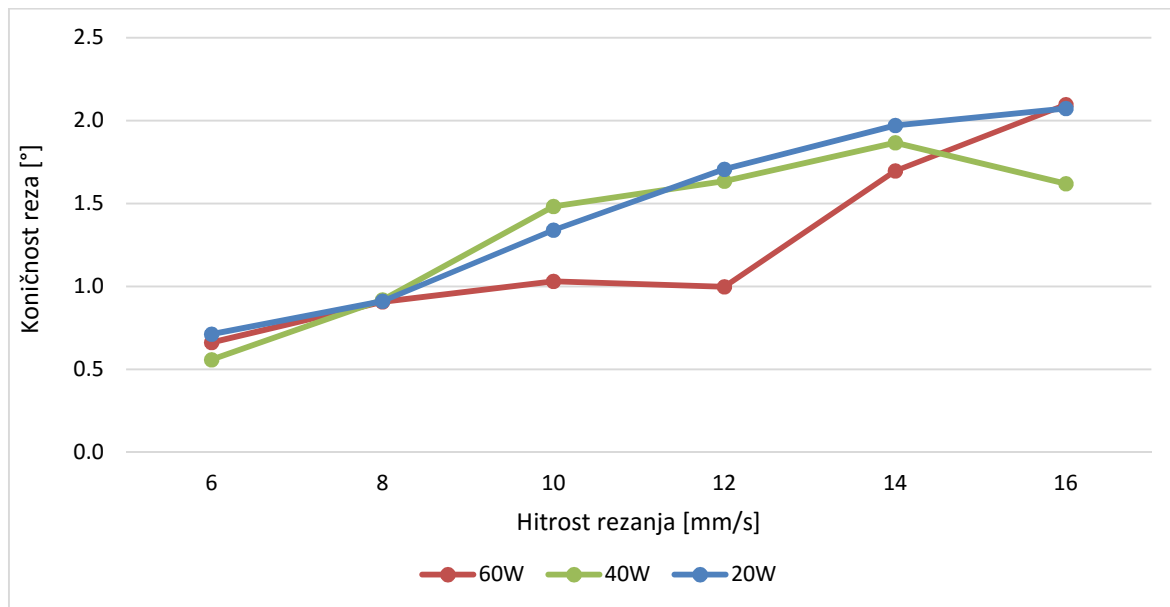


Slika 31: VP4; Povprečna širina reza zgoraj in spodaj v odvisnosti od hitrosti rezanja pri različnih močeh laserja

4.3 KONIČNOST REZA

4.3.1 Izračun koničnosti reza na vezani plošči debeline 10 mm

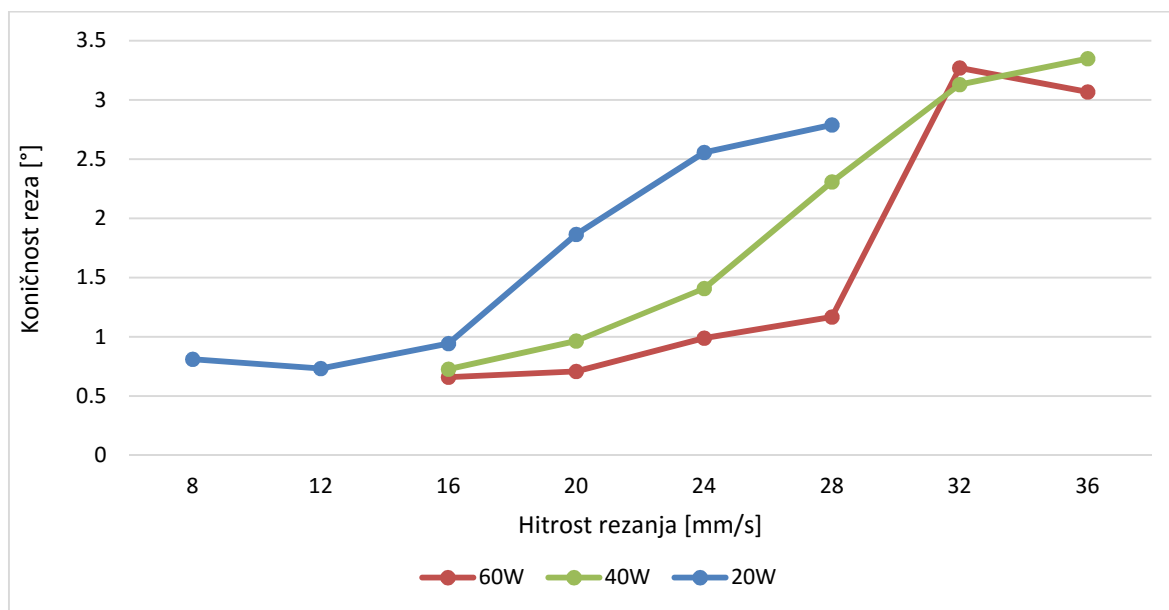
Na sliki 32 smo prikazali povprečne rezultate izračunane koničnosti reza za VP10, v odvisnosti od hitrosti rezanja, pri različnih močeh laserskega žarka. Iz slike lahko razberemo, da se koničnost reza z višanjem hitrosti rezanja povečuje.



Slika 32: VP10; Povprečna koničnost reza v odvisnosti od hitrosti rezanja pri različnih močeh laserja

4.3.2 Izračun koničnosti reza na vezani plošči debeline 5 mm

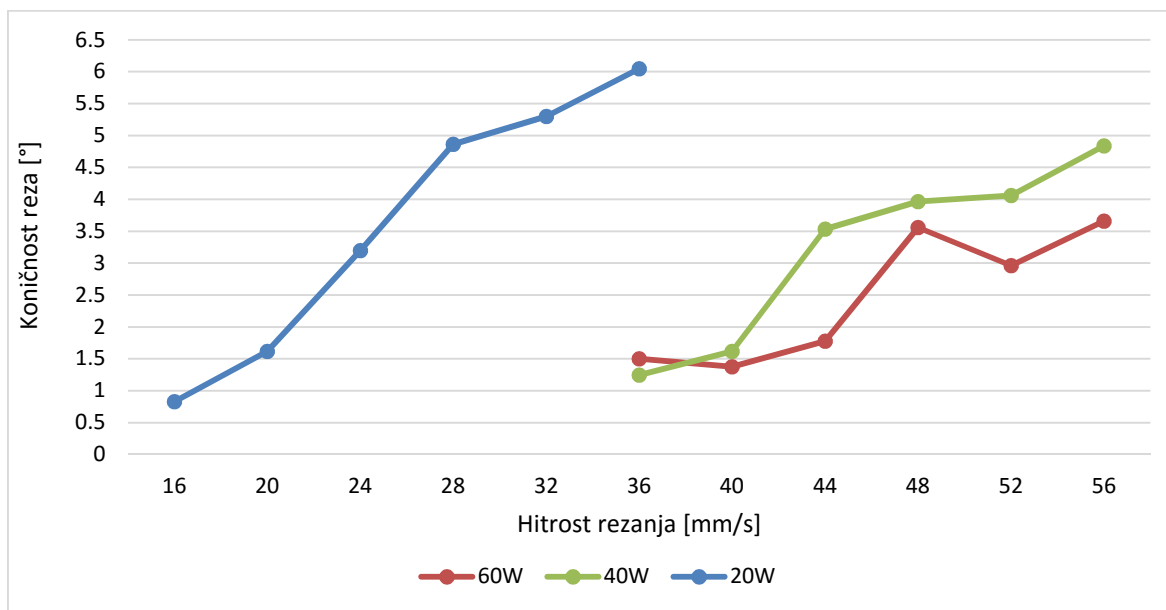
Na sliki 33 smo prikazali povprečne rezultate izračunane koničnosti reza, v odvisnosti od hitrosti rezanja, pri različnih močeh laserskega žarka, za VP5. Navezujoč na sliko vidimo, da koničnost reza vidno narašča, ko enkrat preidemo hitrost rezanja, za katero preizkušanci niso več prerezani skozi celotno debelino. Vidimo tudi, da z močjo laserskega žarka ne moremo vidno vplivati na koničnost reza.



Slika 33: VP5; Povprečna koničnost reza v odvisnosti od hitrosti rezanja pri različnih močeh laserja

4.3.3 Izračun koničnosti reza na vezani plošči debeline 4 mm

Na sliki 34 smo prikazali povprečne rezultate izračunane koničnosti reza za VP4, v odvisnosti od hitrosti rezanja, pri različnih močeh laserskega žarka. Pri moči laserskega žarka 60 W vidimo, da koničnost z višanjem hitrosti rezanja stalno ne narašča, kar je pripisujemo dejstvu, da je les nehomogen material.

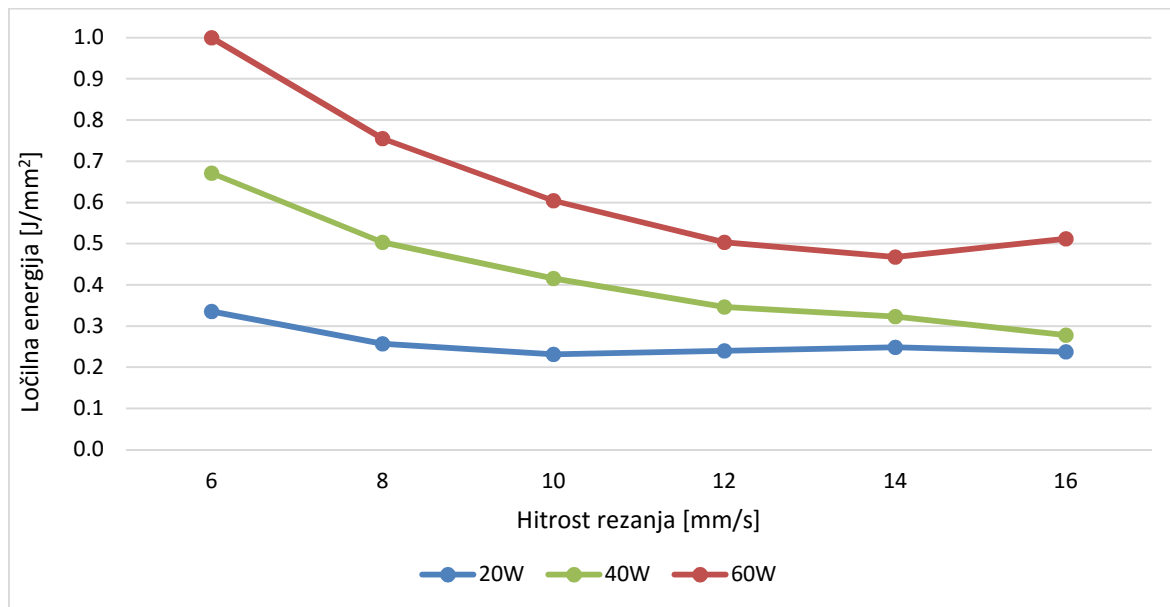


Slika 34: VP4; Povprečna koničnost reza v odvisnosti od hitrosti rezanja pri različnih močeh laserja

4.4 LOČILNA ENERGIJA

4.4.1 Izračun ločilne energije razreza vezane plošče nazivne debeline 10 mm

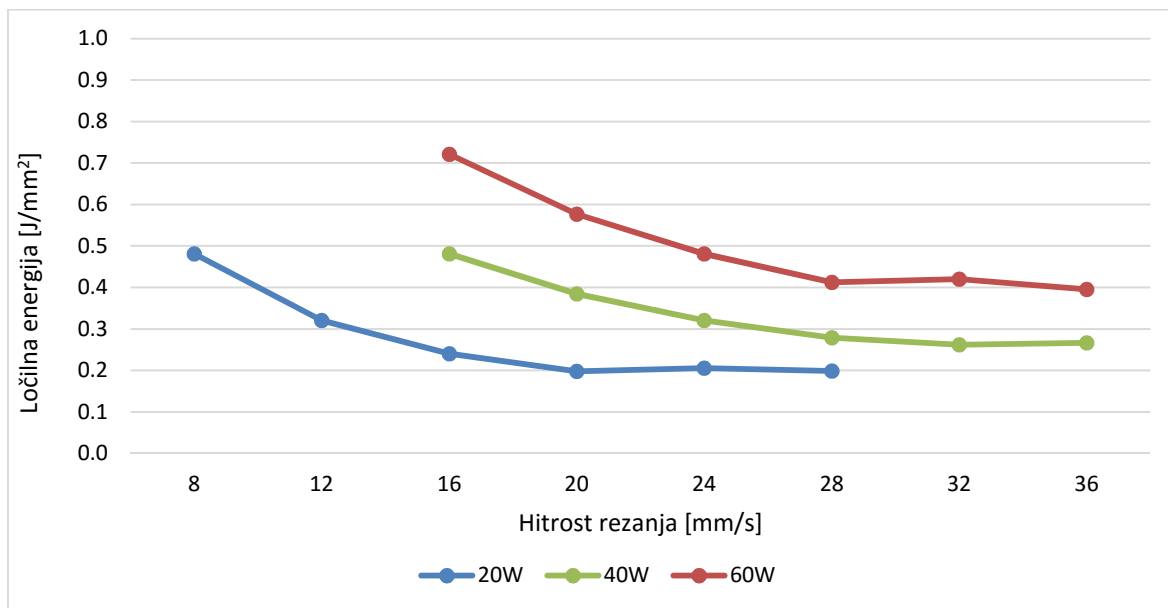
Na sliki 35 smo prikazali povprečne rezultate izračunane ločilne energije, v odvisnosti od hitrosti rezanja, pri različnih močeh laserskega žarka za VP10. Iz slike je jasno razvidno, da se ločilna energija z višanjem hitrosti rezanja niža.



Slika 35: VP10; Povprečna ločilna energija razreza vezane plošče v odvisnosti od hitrosti rezanja pri različnih močeh laserja

4.4.2 Izračun ločilne energije razreza vezane plošče nazivne debeline 5 mm

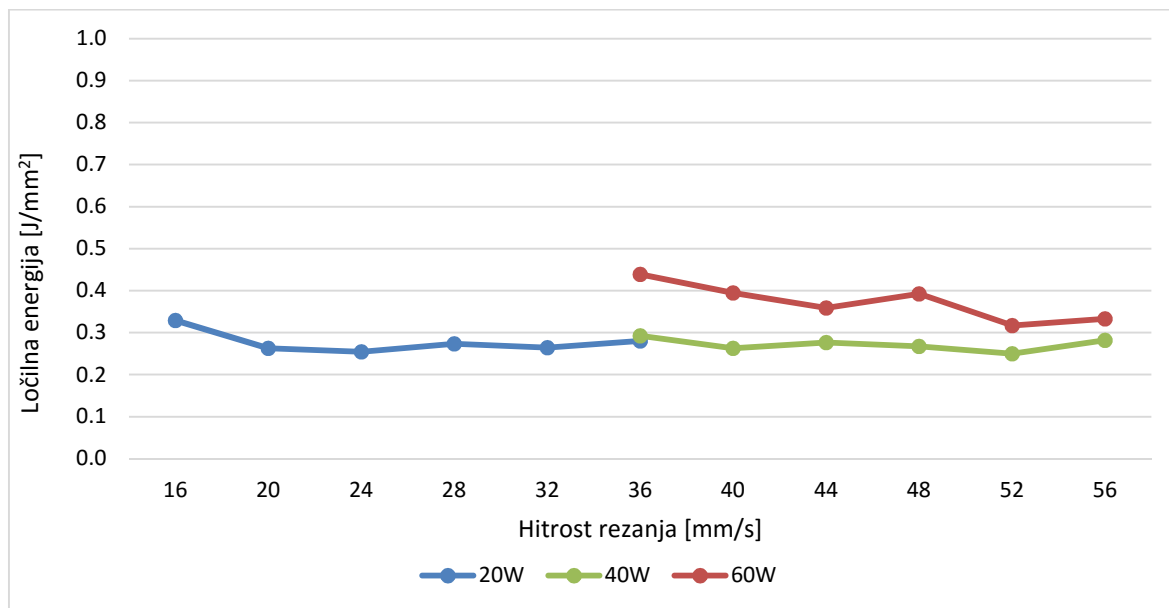
Na sliki 36 smo prikazali povprečne rezultate izračunane ločilne energije, v odvisnosti od hitrosti rezanja, pri različnih močeh laserskega žarka za VP5. Na sliki je pri nižjih hitrostih rezanja viden večji naklon nizov, kar nakazuje, da smo v razrez vlagali preveč energije. Ko enkrat preidemo hitrost rezanja, za katero preizkušanci niso bili več prerezani skozi celotno debelino, se naklon nizov bolj ali manj izravna.



Slika 36: VP5; Povprečna ločilna energija razreza vezane plošče v odvisnosti od hitrosti rezanja pri različnih močeh laserja

4.4.3 Izračun ločilne energije razreza vezane plošče nazivne debeline 4 mm

Na sliki 37 smo prikazali povprečne rezultate izračunane ločilne energije, v odvisnosti od hitrosti rezanja, pri različnih močeh laserskega žarka za VP4. Pri tanjši vezani plošči (VP4) vidimo, da je ločilna energija manj odvisna od moči laserskega žarka. Vidimo tudi, da se z višanjem hitrosti rezanja ločilna energija manj spreminja, kot smo to opazili pri debelejši vezani plošči (VP5 in VP4).



Slika 37: VP4; Povprečna ločilna energija razreza vezane plošče v odvisnosti od hitrosti rezanja pri različnih močeh laserja

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

5.1 RAZPRAVA

5.1.1 Globina reza

Z vidika kapacitete razreza z laserskim strojem je smiselno iskati najvišjo hitrost rezanja, pri kateri so bili vsi preizkušanci prerezani skozi celotno debelino. Povečevanje hitrosti rezanja, ob konstantni moči laserskega žarka, slej kot prej privede do stanja, ko te zahteve ne moremo več v celoti izpolniti. V tem območju je proces rezanja nestabilen. Pri analiziranju globin reza ugotavljamo, da je v tem območju padec globine iz ene hitrostne stopnje v drugo zelo intenziven, kljub temu, da je korak stopnjevanja hitrosti rezanja majhen (samo 2 mm/s).

Na slikah 17, 18 in 19 smo z vstavljenimi slikami prerezov poskusili prikazati vpliv spojev posameznih furnirnih listov na globino rezanja. Iz omenjenih slik je razvidno, da se naklon nizov na teh mestih nekoliko zmanjša, kar kaže na dejstvo, da spoji furnirnih listov vplivajo na globino rezanja. Razloge za to lahko pripisujemo UF lepilu, ki za rezanje predstavlja oviro.

Iz zgoraj omenjenih slik je razvidno, da povečanje moči laserskega žarka omogoča večjo hitrost rezanja pri enaki debelini obdelovanca oziroma večje globine rezanja pri enaki hitrosti rezanja.

Pri sliki 19 moramo opozoriti na rezultate pri rezanju z močjo 60 W. Na sliki se na enem delu vidijo slabši rezultati pri nižji hitrosti rezanja, v primerjavi z višjo, kar na prvi pogled ni logično, vendar opozori na dejstvo, da je les nehomogen material.

Pri tanjši vezani plošči (npr. VP5 in VP4) se učinek višanja moči laserskega žarka, glede na hitrost rezanja, pozna bistveno bolj kot pri debelejši vezani plošči (VP10). Za primer vzemimo sliko 17, ki prikazuje rezanje VP10, kjer vidimo, da se območje primerne hitrosti rezanja za različne moči giblje od 6 mm/s za 20 W, do 10 mm/s za 60 W (razlika samo 4 mm/s). Za drugi primer vzemimo sliko 19, ki prikazuje rezanje VP4, kjer vidimo, da je območje primerne hitrosti rezanja bistveno večje in se giblje od 20 mm/s za 20 W pa tja do 44 mm/s za 60 W (razlika 24 mm/s). Od tod je tudi razlog, da smo morali pri tanjših vezanih ploščah (VP5 in VP4) opazovano območje hitrosti rezanja razdvojiti za različne moči laserja. Razlog za ta pojav, poleg različnih debelin furnirnih vezanih plošč, pripisujemo tudi različnemu številu furnirnih slojev in s tem v povezavi različnemu številu lepilnih spojev, ki negativno vplivajo na globino reza. Furnirni plošči VP4 in VP5 sta namreč sestavljeni samo iz treh slojev furnirja, med tem ko je VP10 sestavljena iz petih slojev furnirnih listov.

Preglednica 5 prikazuje najvišje hitrost rezanja pri dani moči laserskega žarka, pri katerih so bili vsi preizkušanci prerezani skozi celotno debelino.

Preglednica 5: Optimalni parametri razreza furnirne vezane plošče z vidika globine reza in kapacitete stroja

Debelina topolove vezane plošče	Moč laserskega žarka		
	20 W	40 W	60 W
VP10	6 mm/s	8 mm/s	10 mm/s
VP5	16 mm/s	24 mm/s	28 mm/s
VP4	20 mm/s	40 mm/s	44 mm/s

5.1.2 Širina reza

Z vidika izkoristka materiala je smiselno iskati najožji rez, pri katerem so bili preizkušanci prerezani skozi celotno debelino. Na slikah od 20 do 31 smo prikazali rezultate meritev širine reza na zgornji strani vezane plošče (vstop laserskega žarka) in na spodnji strani vezane plošče (izstop laserskega žarka).

Iz slik je razvidno, da je rez na spodnji, izstopni strani ožji od širine reza na zgornji, vstopni strani vezane plošče, kar lahko pripisujemo dejstvu, da je vstopna moč laserskega žarka v vezano ploščo večja, kot na izstopu iz vezane plošče.

Ugotavljamo, da na širino reza ugodno vpliva majhna moč laserskega žarka. Na sliki 23, je razvidno, da najožje reze dosegamo pri najmanjši moči laserskega žarka (20 W). Zanimivo je dejstvo, da se širine rezov narejene z močjo 40 W zanemarljivo razlikujejo od širin rezov narejenih z močjo 60 W, kar dokazuje, da se širina reza z močjo laserskega žarka ne spreminja linearno.

Na sliki 27 je razvidno, da se širina reza na vstopni strani laserskega žarka zanemarljivo spreminja s hitrostjo rezanja. Z drugimi besedami: občutno ožji rez na vstopni strani ne bomo dosegli z višanjem hitrosti rezanja pač pa z manjšanjem moči laserskega žarka. Na isti sliki lahko opazimo tudi, da se širina reza na izstopni strani laserskega žarka z večanjem hitrosti rezanja vidno zmanjšuje, kar povzroča neželeni efekt koničnosti reza.

Na sliki 28 je lepo vidno, da se rez na zgornji strani širi, med tem ko na spodnji strani postaja vse ožji, do trenutka, ko laserski žarek vezane plošče več ne prereže skozi celotno debelino. Širjenje reza na zgornji strani pripisujemo dejstvu, da ko enkrat laserski žarek vezane plošče več ne prereže skozi celotno debelino, se vsa toplota in produkti sežiganja (dimni plini) odstranijo na zgornji strani, kar povzroča, da je rez bolj ožgan in posledično na zgornji strani tudi vse širši.

Preglednica 6 prikazuje optimalne hitrosti rezanja pri dani moči laserskega žarka, pri katerih so bili rezi najožji in hkrati vsi preizkušanci prerezani skozi celotno debelino. Optimalni parametri za posamezno debelino vezane plošče so označeni s krepko pisavo.

Preglednica 6: Optimalni parametri razreza furnirne vezane plošče z vidika širine reza

Debelina topolove vezane plošče	Moč laserskega žarka		
	20 W	40 W	60 W
VP10	6 mm/s	8 mm/s	10 mm/s
VP5	16 mm/s	24 mm/s	28 mm/s
VP4	20 mm/s	40 mm/s	40 mm/s

5.1.3 Koničnost reza

Z vidika nadaljnje obdelave in uporabnosti izdelka, koničnost reza ni želen pojav, kateremu pa se pri rezanju furnirne vezane plošče z laserjem nismo mogli izogniti. Na slikah 32, 33 in 34 smo prikazali povprečne rezultate izračunane koničnosti reza.

Iz slik lahko razberemo, da se koničnost reza veča z višanjem hitrosti rezanja. Ugotavljamo, da koničnost reza vidno narašča, ko enkrat preidemo hitrost rezanja, za katero preizkušanci niso več prerezani skozi celotno debelino. V prejšnjem naslovu smo že navedli, da je širina vstopnega reza bolj ali manj konstantna ob spreminjanju hitrosti rezanja, od tod sledi ugotovitev, da ima največji vpliv na koničnost rezanja širina reza na izstopni strani laserja, ki se z višanjem hitrosti rezanja zmanjšuje in tako privede do večje koničnosti.

Ugotavljamo tudi, da z močjo laserskega žarka ne moremo vidno vplivati na koničnost reza.

Koničnost reza se v območju, kjer so preizkušanci prerezani skozi celotno debelino, giblje v vrednostih med $0,6^\circ$ in $1,8^\circ$.

Preglednica 7 prikazuje optimalne hitrosti rezanja pri dani moči laserskega žarka, pri katerih so bili rezi najmanj konični in hkrati vsi preizkušanci prerezani skozi celotno debelino. Izbrali smo najnižje vrednosti koničnosti reza, katere nastajajo pri manjših hitrostih rezanja, vendar pa moramo razumeti, da so premajhne hitrosti rezanja (oziroma prevelika moč) razlog za ožganine na spodnji strani vezane plošče, zato so nekatere vrednosti v preglednici ustrezno višje. Optimalni parametri za posamezno debelino vezane plošče so označeni s krepko pisavo.

Preglednica 7: Optimalni parametri razreza furnirne vezane plošče z vidika koničnosti reza

Debelina topolove vezane plošče	Moč laserskega žarka		
	20 W	40 W	60 W
VP10	6 mm/s	8 mm/s	8 mm/s
VP5	12 mm/s	16 mm/s	16 mm/s
VP4	16 mm/s	36 mm/s	40 mm/s

5.1.4 Ločilna energija

Iz slik 35, 36 in 37 je razvidno, da se ločilna energija z višanjem hitrosti rezanja niža (ostali parametri so konstantni), kar je tudi logično, saj je v formuli za izračun ločilne energije hitrost rezanja v imenovalcu. V tem primeru smo iskali vrednost parametrov, kjer je moč najmanjša, hitrost največja in preizkušanci prerezani skozi celotno debelino.

Na slikah je na levi strani viden večji naklon nizov, kar nakazuje, da smo v razrez vlagali preveč energije. Ko enkrat preidemo hitrost rezanja, za katero preizkušanci niso bili več prerezani skozi celotno debelino, se naklon nizov bolj ali manj izravna. Optimalne rezultate za ločilno energijo bomo dosegli ravno na tej mejni točki.

Pri debelejši vezani plošči (VP10) se je izkazalo, da je ločilna energija najmanjša, če ploščo režemo z manjšo močjo laserskega žarka (20 W), kljub nižji hitrosti rezanja. Zadeva je manj očitna pri tanjši vezani plošči (VP4).

Preglednica 8 prikazuje optimalne hitrosti rezanja pri dani moči laserskega žarka, pri katerih je ločilna energija najmanjša in so hkrati vsi preizkušanci prerezani skozi celotno debelino. Optimalni parametri za posamezno debelino vezane plošče so označeni s krepko pisavo.

Preglednica 8: Optimalni parametri razreza furnirne vezane plošče z vidika ločilne energije

Debelina topolove vezane plošče	Moč laserskega žarka		
	20 W	40 W	60 W
VP10	6 mm/s	8 mm/s	10 mm/s
VP5	16 mm/s	24 mm/s	28 mm/s
VP4	20 mm/s	40 mm/s	44 mm/s

Iz slik 35, 36 in 37 je razvidno, da pri optimalnih parametrih ločilna energija ne predstavlja vedno iste vrednosti, zato uporaba ločilne energije kot konstanta za izračun optimalnih parametrov pride le pogojno v poštev. Razlog za taka nihanja lahko pripisujemo različnemu številu slojev furnirnih listov in posledično različnemu številu lepilnih spojev, ki negativno vplivajo na rezanje lesa z laserjem. V preglednici 9 smo zbrali vrednosti ločilne energije pri optimalnih parametrih, za vse tri debeline furnirne vezane plošče in za vse tri raziskovane moči. Vidimo, da se vrednosti ločilne energije gibljejo od 0,24 J/mm² pa tja do 0,6 J/mm².

Preglednica 9: Vrednosti ločilne energije pri optimalnih parametrih razreza furnirne vezane plošče

Debelina topolove vezane plošče	Moč laserskega žarka		
	20 W	40 W	60 W
VP10	0,34 J/mm²	0,5 J/mm ²	0,6 J/mm ²
VP5	0,24 J/mm²	0,32 J/mm ²	0,41 J/mm ²
VP4	0,26 J/mm²	0,26 J/mm ²	0,36 J/mm ²

Če se omejimo samo na moč laserskega žarka 20 W, za katero ugotavljamo, da je ločilna energija najmanjša (vrednosti so v preglednici 9 označene s krepko pisavo), vidimo, da je

najvišja vrednost iz tega stolpca $0,34 \text{ J/mm}^2$. To vrednost bi lahko pogojno uporabili za izračun približne hitrosti rezanja topolove furnirne vezane plošče neznane debeline, pri moči laserskega žarka 20 W , s pomočjo formule 3, kar smo prikazali v izračunih 4, 5 in 6.

$$v = \frac{P}{E \times c} \quad \dots(3)$$

$$v_{VP10} = \frac{20W}{0,34J/mm^2 \times 10mm} = 5,9mm/s \quad \dots(4)$$

$$v_{VP5} = \frac{20W}{0,34J/mm^2 \times 5mm} = 11,8mm/s \quad \dots(5)$$

$$v_{VP} = \frac{20}{0,34J/mm^2 \times 4mm} = 14,7mm/s \quad \dots(6)$$

Za natančnejše podatke bi morali opraviti več meritev laserskega razreza, s spreminjanjem debeline furnirne vezane plošče, števila slojev furnirskih listov (lepilnih spojev), gostote ...

5.2 SKLEPI

Na osnovi rezultatov opravljene raziskave lahko postavimo naslednje sklepe.

- Potrdili smo hipotezo 1, da povečanje moči laserskega žarka omogoča večjo hitrost rezanja pri enaki debelini obdelovanca (vezane plošče) oziroma večje globine rezanja pri enaki hitrosti rezanja.
- Pri tanjši vezani plošči (npr. VP5 in VP4) se učinek višanja moči laserskega žarka, glede na hitrost rezanja, pozna bistveno bolj kot pri debelejši vezani plošči (VP10).
- Potrdili smo hipotezo 2, da večja moč povzroči povečanje širine reza, zaradi večjega vnosa toplote poslabša kakovost novo nastale površine, v skrajnih situacijah pa leseni obdelovanec lahko celo zagori.
- Širina reza na vstopni strani laserja, se pri isti moči laserskega žarka zanemarljivo spreminja s hitrostjo rezanja.
- Širina reza na izstopni strani laserja se pri isti moči laserskega žarka vidno zmanjšuje z večanjem hitrosti rezanja, kar povzroča neželeni efekt koničnosti reza.
- Ugotovili smo, da se koničnost reza veča z višanjem hitrosti rezanja, pri isti moči laserskega žarka.

- Ugotovili smo, da z močjo laserskega žarka ne moremo vidno vplivati na koničnost reza.
- Ugotovili smo, da je ločilna energija najmanjša, če ploščo režemo z manjšo močjo laserskega žarka, kljub nižji hitrosti rezanja.
- Ugotovili smo, da pri optimalnih parametrih ločilna energija ne predstavlja vedno iste vrednosti, zato uporaba ločilne energije kot konstanta za izračun optimalnih parametrov pride le pogojno v poštev.
- Potrdili smo hipotezo 3, da lepilo med slojema furnirjev vezane plošče vpliva na globino reza - globina reza pogosto sega samo do območja lepilnega spoja dveh furnirjev vezane plošče.
- S poskusi smo uspeli definirati optimalno hitrost (hipoteza 4) in moč laserskega žarka (hipoteza 5) za rezanje topolove furnirne vezane plošče različnih debelin. Za VP10 so optimalni parametri rezanja 20 W in 6 mm/s, za VP5 so optimalni parametri rezanja 20 W in 16 mm/s in za VP4 so optimalni parametri rezanja 20 W in 20 mm/s.

6 POVZETEK

V lesnoobdelovalni industriji se srečujemo z vrsto strojev in naprav, ki morajo na konkurenčnem trgu proizvajati kvalitetne proizvode s čim manjšimi stroški. Pri obdelovanju lesa z laserjem je potrebno najti kompromis med kvaliteto obdelane površine, hitrostjo obdelovanja in ekonomskim vidikom proizvodnje. V diplomskem delu smo proučevali vpliv parametrov laserskega razreza topolove furnirne vezane plošče na kakovost reza. Za izvajanje poizkusov smo uporabili topolovo furnirno vezano ploščo, zlepljeno z urea-formaldehidnim lepilom, namenjeno za notranjo uporabo. Iz furnirne vezane plošče smo izžagali preizkušance, v katere smo z laserjem zarezovali zareze z različno nastavljenimi parametri stroja. Za razrez topolove furnirne vezane plošče smo uporabili lasersko gravirni stroj Glaser JQ 9060, ki ga uvrščamo v skupino CO₂ laserjev, čigar maksimalna moč laserskega žarka znaša 80 W. Topolovo vezano ploščo 3 različnih debelin (10 mm, 5 mm in 4 mm), smo rezali z različnimi hitrostmi rezanja in močmi laserja z namenom določitve optimalnih parametrov rezanja za kvaliteten rez. Za izhodišče smo izbrali 3 jakostne stopnje laserskega žarka (20 W, 40 W, 60 W) ter različne hitrosti rezanja (od 6 mm/s do 56 mm/s). Preizkušance smo na formatnem krožnem žagalnem stroju razžagali na manjše lamele, v smeri pravokotno na laserske reze. Vsako zarezo posebej smo nato iz čela vezane plošče poslikali na mikroskopu. Vse slike smo nato analizirali z računalniškim programom Digimizer (merjenje globine in širine reza), iz katerega smo podatke prenesli v računalniški program Excel in podatke, za lažje analiziranje, prikazali v grafični obliki. Iz izmerjenih podatkov smo izračunali koničnost reza in ločilno energijo. Na podlagi rezultatov globine in širine reza ter izračuna kota reza (koničnost robov) in ločilne energije, smo določili optimalno hitrost in moč laserskega razreza za izbrano debelino topolove furnirne vezane plošče.

Prikazali smo, da lepilo med slojema furnirjev vezane plošče vpliva na globino reza - globina reza pogosto sega samo do območja lepilnega spoja dveh furnirjev vezane plošče. Prikazali smo tudi, da povečanje moči laserskega žarka omogoča večjo hitrost rezanja pri enaki debelini obdelovanca oziroma večje globine rezanja pri enaki hitrosti rezanja. Potrdili smo hipotezo, da večja moč povzroči povečanje širine reza, zaradi večjega vnosa toplote poslabša kakovost novo nastale površine, v skrajnih situacijah pa nam leseni obdelovanec lahko celo zagori. Ugotovili smo, da se pri tanjši vezani plošči (npr. VP5 in VP4) učinek višanja moči laserskega žarka, glede na hitrost rezanja, pozna bistveno bolj kot pri debelejši vezani plošči (VP10).

Prikazali smo, da je rez na spodnji, izstopni strani ožji od širine reza na zgornji, vstopni strani vezane plošče, kar lahko pripisujemo dejstvu, da je vstopna moč laserskega žarka v vezano ploščo večja, kot na izstopu iz vezane plošče. Ugotavljamo, da na širino reza ugodno vpliva majhna moč laserskega žarka in da se širina reza z močjo laserskega žarka ne spreminja linearno. Širina reza na vstopni strani laserja, se pri isti moči laserskega žarka zanemarljivo spreminja s hitrostjo rezanja, medtem ko se širina reza na izstopni strani laserja pri isti moči laserskega žarka vidno zmanjšuje z večanjem hitrosti rezanja, kar povzroča neželeni efekt koničnosti reza.

Ugotovili smo, da se koničnost reza veča z višanjem hitrosti rezanja ter da z močjo laserskega žarka ne moremo vidno vplivati na koničnost reza.

Ugotovili smo, da je ločilna energija najmanjša, če ploščo režemo z manjšo močjo laserskega žarka, kljub nižji hitrosti rezanja in da pri optimalnih parametrih ločilna energija ne predstavlja vedno iste vrednosti, zato uporaba ločilne energije kot konstanta za izračun optimalnih parametrov pride le pogojno v poštev.

Potrdili smo hipoteze, saj smo s poskusi uspeli definirati optimalno hitrost in moč laserskega žarka za rezanje topolove furnirne vezane plošče različnih debelin. Za VP10 so optimalni parametri rezanja 20 W in 6 mm/s, za VP5 so optimalni parametri rezanja 20 W in 16 mm/s in za VP4 so optimalni parametri rezanja 20 W in 20 mm/s.

7 VIRI

- Barcikowski S., Koch G., Odermatt J. 2006. Characterisation and modification of the heat affected zone during laser material processing of wood and wood composites. Holz als Roh- und Werkstoff, 64: 94-103
- Chryssolouris G. 1991. Laser machining, theory and practice. New York, Springer – Verlag: 274 str.
- Čermak M. Furnirji in plošče. 1996. Ljubljana. Lesarska založba: 204 str.
- Eltawahni H. A., Rossini N. S., Dassisti M., Alrashed K., Aldaham T. A., Benyounis K. Y., Olabi A. G. 2013. Evaluation and optimization of laser cutting parameters for plywood materials. Optics and lasers in engineering, 51: 1029-1043
- Eltawahni, H. A., Olabi, A.G., Benyounis, K.Y., 2011: Investigating the CO₂ laser cutting parameters of MDF wood composite material. Optics & Laser Technology, 43, 3: 648-659
- Li R. Guo X. Cao P. Wang X.A. 2016. Optimization of laser cutting parameters for recombinant bamboo based on response surface methodology. Wood research, 61, 2: 275-286 str.
- Maček P. 2006. Lasersko rezanje vlaknene plošče. Diplomsko. delo. Ljubljana. Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 61 str.
- Mešić N. 1998. Furniri, furnirske i stolarske ploče. Sarajevo, Grafika Šaran: 386 str.
- Nikolić M. S. 1988. Furniri i slojevite ploče. Beograd, Građevinska knjiga: 414 str.
- Powell J. 1993. CO₂ laser cutting. London, Springer- Verlag: 246 str.
- Powell J. 2002. CO₂ laser cutting of wood – based products. The industrial laser user: 27
- Ready J. F. 1997. Industrial applications of lasers. 2nd edition. New York, Academic Press: 599 str.
- Resnik J. 1997. Lepila in lepljenje lesa. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Univerza v Ljubljani: 103 str.
- Steen W. M. 2003. Laser material processing. 3rd edition. London, Springer-Verlag: 408 str.
- Šernek M. 1999. Vpliv bistvenih dejavnikov na penetracijo in trdnost UF lepilnega spoja pri lepljenju bukovine. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 111 str.

Šernek M. 2007. Furnir in lepljen les; študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 50 str.

Valentinčič J., Orbanič H., Kramar D., Junkar M. 2012. Alternativne tehnologije. Ljubljana, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani: 160 str.

ZAHVALA

Zahvaljujem se podjetju Adria Mobil, d. o. o., ki mi je finančno omogočilo študij ter mi v času študija nudilo vso podporo, še posebej velja zahvala g. Francu Štuparju in g. Jožetu Tomšiču ter ostalim sodelavcem.

Iskreno se zahvaljujem mentorju prof. dr. Milanu Šerneku in somentorju doc. dr. Mirku Karižu, za pomoč in usmerjanje pri nastajanju diplomskega dela.

Prav tako bi se rad zahvalil recenzentki izr. prof. dr. Manji Kitek Kuzman za nasvete in opravljeno recenzijsko delo.

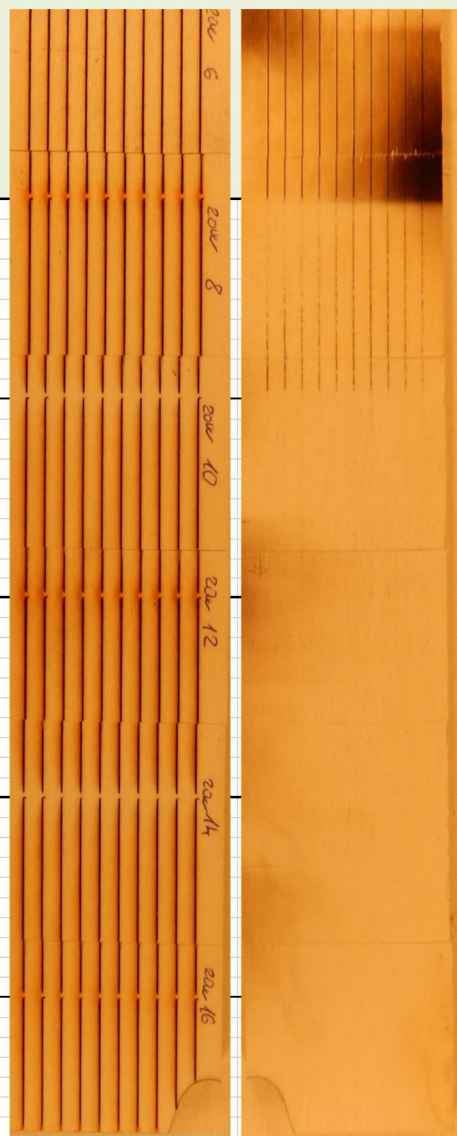
Rad bi se zahvalil mojim domačim, ki so verjeli vame, me podpirali in vzpodbujali za dosego ciljev.

Nenazadnje pa gre zahvala tudi ženi Barbari, hčerki Lari in sinu Lovru, ki so mi ves čas stali ob strani in ki so me morali večkrat potrpežljivo počakati.

PRILOGE

PRILOGA A: Rezultati meritev rezanja furnirne vezane plošče nazivne debeline 10 mm, z močjo laserja 20 W

moč [%]	moč [W]	hitrost [mm/s]	debelina VP [mm]	globina reza	širina reza zgoraj	širina reza spodaj	koničnost reza	ločilna energija
25	20	6	9.93	9.93	0.38	0.15	0.65	0.34
25	20	6	9.93	9.93	0.46	0.17	0.85	0.34
25	20	6	9.93	9.93	0.45	0.18	0.77	0.34
25	20	6	9.93	9.93	0.47	0.13	0.98	0.34
25	20	6	9.93	9.93	0.47	0.21	0.73	0.34
25	20	6	9.93	9.93	0.45	0.13	0.93	0.34
25	20	6	9.93	9.93	0.42	0.20	0.64	0.34
25	20	6	9.93	9.93	0.39	0.22	0.48	0.34
25	20	6	9.93	9.93	0.39	0.20	0.56	0.34
25	20	6	9.93	9.93	0.39	0.21	0.53	0.34
25	20	8	9.93	9.93	0.44	0.20	0.69	0.25
25	20	8	9.93	9.93	0.39	0.13	0.77	0.25
25	20	8	9.93	9.93	0.44	0.11	0.94	0.25
25	20	8	9.93	9.93	0.48	0.10	1.09	0.25
25	20	8	9.93	9.93	0.39	0.10	0.85	0.25
25	20	8	9.93	9.93	0.37	0.18	0.53	0.25
25	20	8	9.93	9.93	0.37	0.20	0.49	0.25
25	20	8	9.93	9.76	0.38	0.00	1.10	0.26
25	20	8	9.93	9.65	0.38	0.00	1.12	0.26
25	20	8	9.93	8.58	0.46	0.00	1.54	0.29
25	20	10	9.93	8.36	0.44	0.00	1.50	0.24
25	20	10	9.93	8.21	0.42	0.00	1.47	0.24
25	20	10	9.93	9.65	0.46	0.00	1.38	0.21
25	20	10	9.93	8.86	0.41	0.00	1.32	0.23
25	20	10	9.93	8.32	0.36	0.00	1.25	0.24
25	20	10	9.93	9.44	0.38	0.00	1.15	0.21
25	20	10	9.93	9.40	0.38	0.00	1.15	0.21
25	20	10	9.93	8.14	0.39	0.00	1.38	0.25
25	20	10	9.93	8.80	0.42	0.00	1.36	0.23
25	20	10	9.93	7.74	0.39	0.00	1.44	0.26
25	20	12	9.93	6.18	0.48	0.00	2.21	0.27
25	20	12	9.93	6.68	0.42	0.00	1.81	0.25
25	20	12	9.93	7.38	0.38	0.00	1.48	0.23
25	20	12	9.93	8.13	0.44	0.00	1.54	0.20
25	20	12	9.93	7.44	0.42	0.00	1.62	0.22
25	20	12	9.93	7.13	0.39	0.00	1.58	0.23
25	20	12	9.93	6.81	0.35	0.00	1.47	0.24
25	20	12	9.93	7.00	0.41	0.00	1.67	0.24
25	20	12	9.93	7.15	0.41	0.00	1.63	0.23
25	20	12	9.93	6.07	0.43	0.00	2.05	0.27
25	20	14	9.93	5.95	0.41	0.00	1.97	0.24
25	20	14	9.93	6.12	0.39	0.00	1.84	0.23
25	20	14	9.93	5.69	0.39	0.00	1.97	0.25
25	20	14	9.93	5.46	0.37	0.00	1.93	0.26
25	20	14	9.93	5.69	0.37	0.00	1.85	0.25
25	20	14	9.93	5.72	0.40	0.00	1.99	0.25
25	20	14	9.93	5.61	0.42	0.00	2.15	0.25
25	20	14	9.93	6.15	0.43	0.00	2.01	0.23
25	20	14	9.93	5.80	0.37	0.00	1.81	0.25
25	20	14	9.93	5.32	0.41	0.00	2.19	0.27
25	20	16	9.93	3.71	0.40	0.00	3.09	0.34
25	20	16	9.93	4.04	0.44	0.00	3.14	0.31
25	20	16	9.93	5.80	0.34	0.00	1.68	0.22
25	20	16	9.93	5.95	0.38	0.00	1.84	0.21
25	20	16	9.93	5.84	0.38	0.00	1.87	0.21
25	20	16	9.93	5.55	0.41	0.00	2.11	0.23
25	20	16	9.93	5.61	0.42	0.00	2.16	0.22
25	20	16	9.93	5.84	0.35	0.00	1.72	0.21
25	20	16	9.93	5.74	0.27	0.00	1.33	0.22
25	20	16	9.93	5.85	0.37	0.00	1.79	0.21



PRILOGA B: Rezultati meritev rezanja furnirne vezane plošče nazivne debeline 10 mm, z močjo laserja 40 W

moč [%]	moč [W]	hitrost [mm/s]	debelina VP [mm]	globina reza	širina reza zgoraj	širina reza spodaj	koničnost reza	ločilna energija
50	40	6	9.93	9.93	0.71	0.44	0.78	0.67
50	40	6	9.93	9.93	0.65	0.42	0.66	0.67
50	40	6	9.93	9.93	0.76	0.58	0.54	0.67
50	40	6	9.93	9.93	0.76	0.52	0.69	0.67
50	40	6	9.93	9.93	0.68	0.52	0.45	0.67
50	40	6	9.93	9.93	0.70	0.54	0.45	0.67
50	40	6	9.93	9.93	0.68	0.60	0.25	0.67
50	40	6	9.93	9.93	0.72	0.54	0.53	0.67
50	40	6	9.93	9.93	0.75	0.52	0.65	0.67
50	40	6	9.93	9.93	0.72	0.52	0.57	0.67
50	40	8	9.93	9.93	0.76	0.44	0.94	0.50
50	40	8	9.93	9.93	0.72	0.34	1.10	0.50
50	40	8	9.93	9.93	0.72	0.35	1.06	0.50
50	40	8	9.93	9.93	0.73	0.42	0.90	0.50
50	40	8	9.93	9.93	0.76	0.40	1.06	0.50
50	40	8	9.93	9.93	0.66	0.35	0.89	0.50
50	40	8	9.93	9.93	0.75	0.35	1.14	0.50
50	40	8	9.93	9.93	0.60	0.41	0.57	0.50
50	40	8	9.93	9.93	0.56	0.34	0.65	0.50
50	40	8	9.93	9.93	0.70	0.39	0.89	0.50
50	40	10	9.93	9.93	0.66	0.35	0.89	0.40
50	40	10	9.93	9.93	0.69	0.31	1.10	0.40
50	40	10	9.93	9.93	0.72	0.27	1.30	0.40
50	40	10	9.93	9.93	0.61	0.24	1.06	0.40
50	40	10	9.93	9.93	0.72	0.34	1.09	0.40
50	40	10	9.93	9.93	0.70	0.38	0.93	0.40
50	40	10	9.93	9.68	0.72	0.00	2.12	0.41
50	40	10	9.93	9.47	0.67	0.00	2.04	0.42
50	40	10	9.93	9.13	0.64	0.00	2.02	0.44
50	40	10	9.93	8.63	0.69	0.00	2.28	0.46
50	40	12	9.93	9.93	0.66	0.24	1.22	0.34
50	40	12	9.93	9.93	0.59	0.29	0.85	0.34
50	40	12	9.93	9.93	0.71	0.28	1.22	0.34
50	40	12	9.93	9.93	0.62	0.15	1.34	0.34
50	40	12	9.93	9.49	0.67	0.00	2.04	0.35
50	40	12	9.93	9.10	0.65	0.00	2.04	0.37
50	40	12	9.93	9.02	0.65	0.00	2.06	0.37
50	40	12	9.93	9.48	0.63	0.00	1.90	0.35
50	40	12	9.93	9.69	0.74	0.00	2.20	0.34
50	40	12	9.93	9.93	0.63	0.11	1.49	0.34
50	40	14	9.93	8.64	0.60	0.00	2.00	0.33
50	40	14	9.93	8.75	0.60	0.00	1.97	0.33
50	40	14	9.93	8.96	0.62	0.00	1.98	0.32
50	40	14	9.93	8.69	0.58	0.00	1.90	0.33
50	40	14	9.93	8.82	0.60	0.00	1.96	0.32
50	40	14	9.93	8.81	0.54	0.00	1.74	0.32
50	40	14	9.93	8.74	0.54	0.00	1.76	0.33
50	40	14	9.93	8.43	0.59	0.00	2.01	0.34
50	40	14	9.93	9.13	0.61	0.00	1.91	0.31
50	40	14	9.93	9.55	0.48	0.00	1.43	0.30
50	40	16	9.93	8.93	0.52	0.00	1.67	0.28
50	40	16	9.93	8.86	0.58	0.00	1.86	0.28
50	40	16	9.93	8.45	0.52	0.00	1.77	0.30
50	40	16	9.93	8.61	0.45	0.00	1.50	0.29
50	40	16	9.93	9.69	0.51	0.00	1.50	0.26
50	40	16	9.93	9.61	0.52	0.00	1.55	0.26
50	40	16	9.93	8.89	0.47	0.00	1.50	0.28
50	40	16	9.93	9.08	0.50	0.00	1.56	0.28
50	40	16	9.93	8.78	0.55	0.00	1.79	0.28
50	40	16	9.93	9.19	0.48	0.00	1.50	0.27

PRILOGA C: Rezultati meritev rezanja furnirne vezane plošče nazivne debeline 10 mm, z močjo laserja 60 W

moč [%]	moč [W]	hitrost [mm/s]	debelina VP [mm]	globina reza	širina reza zgoraj	širina reza spodaj	koničnost reza	ločilna energija		
75	60	6	9.93	9.93	0.77	0.55	0.61	1.01	60 6	
75	60	6	9.93	9.93	0.80	0.53	0.78	1.01		
75	60	6	9.93	9.93	0.79	0.52	0.78	1.01		
75	60	6	9.93	9.93	0.78	0.48	0.86	1.01		
75	60	6	9.93	9.93	0.77	0.52	0.70	1.01		
75	60	6	9.93	9.93	0.80	0.50	0.86	1.01		
75	60	6	9.93	9.93	0.75	0.47	0.82	1.01		
75	60	6	9.93	9.93	0.74	0.58	0.49	1.01		
75	60	6	9.93	9.93	0.77	0.58	0.57	1.01		
75	60	6	9.93	9.93	0.76	0.70	0.16	1.01		
75	60	8	9.93	9.93	0.80	0.42	1.10	0.76		
75	60	8	9.93	9.93	0.72	0.41	0.89	0.76		
75	60	8	9.93	9.93	0.67	0.39	0.81	0.76		
75	60	8	9.93	9.93	0.76	0.41	1.01	0.76		
75	60	8	9.93	9.93	0.63	0.32	0.89	0.76		
75	60	8	9.93	9.93	0.70	0.35	1.02	0.76		
75	60	8	9.93	9.93	0.68	0.30	1.10	0.76	60 8	
75	60	8	9.93	9.93	0.59	0.35	0.69	0.76		
75	60	8	9.93	9.93	0.63	0.30	0.98	0.76		
75	60	8	9.93	9.93	0.63	0.42	0.61	0.76		
75	60	10	9.93	9.93	0.60	0.25	1.01	0.60		
75	60	10	9.93	9.93	0.65	0.20	1.29	0.60		
75	60	10	9.93	9.93	0.59	0.22	1.05	0.60		
75	60	10	9.93	9.93	0.71	0.24	1.37	0.60		
75	60	10	9.93	9.93	0.64	0.28	1.05	0.60	60 10	
75	60	10	9.93	9.93	0.63	0.34	0.85	0.60		
75	60	10	9.93	9.93	0.60	0.27	0.97	0.60		
75	60	10	9.93	9.93	0.52	0.28	0.69	0.60		
75	60	10	9.93	9.93	0.53	0.14	1.12	0.60		
75	60	10	9.93	9.93	0.56	0.24	0.92	0.60		
75	60	12	9.93	9.93	0.55	0.16	1.14	0.50		
75	60	12	9.93	9.93	0.60	0.24	1.05	0.50	60 12	
75	60	12	9.93	9.93	0.55	0.28	0.77	0.50		
75	60	12	9.93	9.93	0.63	0.28	1.02	0.50		
75	60	12	9.93	9.93	0.57	0.27	0.89	0.50		
75	60	12	9.93	9.93	0.56	0.23	0.98	0.50		
75	60	12	9.93	9.93	0.58	0.28	0.85	0.50		
75	60	12	9.93	9.93	0.56	0.17	1.14	0.50		
75	60	12	9.93	9.93	0.61	0.27	0.98	0.50		
75	60	12	9.93	9.70	0.55	0.14	1.21	0.52	60 14	
75	60	14	9.93	9.70	0.55	0.00	1.62	0.44		
75	60	14	9.93	8.60	0.59	0.00	1.96	0.50		
75	60	14	9.93	8.82	0.62	0.00	2.01	0.49		
75	60	14	9.93	8.83	0.63	0.00	2.05	0.49		
75	60	14	9.93	8.86	0.52	0.00	1.68	0.48		
75	60	14	9.93	8.82	0.65	0.00	2.09	0.49		
75	60	14	9.93	9.47	0.54	0.00	1.65	0.45		
75	60	14	9.93	9.93	0.56	0.20	1.05	0.43	60 16	
75	60	14	9.93	9.93	0.49	0.15	0.97	0.43		
75	60	14	9.93	8.96	0.59	0.00	1.88	0.48		
75	60	16	9.93	7.38	0.56	0.00	2.19	0.51		
75	60	16	9.93	7.27	0.62	0.00	2.44	0.52		
75	60	16	9.93	7.12	0.45	0.00	1.82	0.53		
75	60	16	9.93	7.54	0.50	0.00	1.88	0.50		
75	60	16	9.93	7.61	0.51	0.00	1.92	0.49		
75	60	16	9.93	7.40	0.58	0.00	2.24	0.51		
75	60	16	9.93	6.96	0.49	0.00	2.03	0.54		
75	60	16	9.93	7.69	0.55	0.00	2.05	0.49		
75	60	16	9.93	6.84	0.55	0.00	2.30	0.55		
75	60	16	9.93	7.53	0.55	0.00	2.09	0.50		

PRILOGA D: Rezultati meritev rezanja furnirne vezane plošče nazivne debeline 5 mm, z močjo laserja 20 W

moč [%]	moč [W]	hitrost [mm/s]	debelina VP [mm]	globina reza	širina reza zgoraj	širina reza spodaj	koničnos t reza	ločilna energija
25	20	8	5.20	5.20	0.32	0.18	0.82	0.48
25	20	8	5.20	5.20	0.32	0.19	0.67	0.48
25	20	8	5.20	5.20	0.44	0.34	0.57	0.48
25	20	8	5.20	5.20	0.35	0.18	0.97	0.48
25	20	8	5.20	5.20	0.42	0.17	1.35	0.48
25	20	8	5.20	5.20	0.45	0.27	1.01	0.48
25	20	8	5.20	5.20	0.30	0.14	0.90	0.48
25	20	8	5.20	5.20	0.27	0.16	0.66	0.48
25	20	8	5.20	5.20	0.38	0.27	0.65	0.48
25	20	8	5.20	5.20	0.36	0.26	0.50	0.48
25	20	12	5.20	5.20	0.34	0.23	0.60	0.32
25	20	12	5.20	5.20	0.35	0.17	0.95	0.32
25	20	12	5.20	5.20	0.43	0.31	0.65	0.32
25	20	12	5.20	5.20	0.29	0.12	0.93	0.32
25	20	12	5.20	5.20	0.30	0.16	0.80	0.32
25	20	12	5.20	5.20	0.51	0.32	1.05	0.32
25	20	12	5.20	5.20	0.31	0.19	0.66	0.32
25	20	12	5.20	5.20	0.35	0.22	0.71	0.32
25	20	12	5.20	5.20	0.33	0.21	0.66	0.32
25	20	12	5.20	5.20	0.34	0.28	0.33	0.32
25	20	16	5.20	5.20	0.38	0.20	0.98	0.24
25	20	16	5.20	5.20	0.36	0.18	0.99	0.24
25	20	16	5.20	5.20	0.39	0.22	0.97	0.24
25	20	16	5.20	5.20	0.31	0.11	1.09	0.24
25	20	16	5.20	5.20	0.31	0.18	0.71	0.24
25	20	16	5.20	5.20	0.41	0.21	1.10	0.24
25	20	16	5.20	5.20	0.37	0.15	1.24	0.24
25	20	16	5.20	5.20	0.31	0.21	0.54	0.24
25	20	16	5.20	5.20	0.38	0.20	0.98	0.24
25	20	16	5.20	5.20	0.35	0.20	0.82	0.24
25	20	20	5.20	5.06	0.38	0.00	2.13	0.20
25	20	20	5.20	5.09	0.35	0.00	1.96	0.20
25	20	20	5.20	4.76	0.34	0.00	2.04	0.21
25	20	20	5.20	5.20	0.39	0.05	1.86	0.19
25	20	20	5.20	5.20	0.33	0.05	1.53	0.19
25	20	20	5.20	5.20	0.41	0.04	2.04	0.19
25	20	20	5.20	5.20	0.38	0.10	1.53	0.19
25	20	20	5.20	4.90	0.36	0.00	2.08	0.20
25	20	20	5.20	5.20	0.33	0.06	1.48	0.19
25	20	20	5.20	4.88	0.34	0.00	2.00	0.20
25	20	24	5.20	4.03	0.41	0.00	2.89	0.21
25	20	24	5.20	4.04	0.36	0.00	2.54	0.21
25	20	24	5.20	4.11	0.35	0.00	2.43	0.20
25	20	24	5.20	3.89	0.36	0.00	2.64	0.21
25	20	24	5.20	4.26	0.34	0.00	2.27	0.20
25	20	24	5.20	3.91	0.39	0.00	2.83	0.21
25	20	24	5.20	4.05	0.33	0.00	2.33	0.21
25	20	24	5.20	4.23	0.34	0.00	2.30	0.20
25	20	24	5.20	3.95	0.37	0.00	2.66	0.21
25	20	24	5.20	4.03	0.38	0.00	2.67	0.21
25	20	28	5.20	3.47	0.36	0.00	2.98	0.21
25	20	28	5.20	3.70	0.38	0.00	2.92	0.19
25	20	28	5.20	3.46	0.39	0.00	3.21	0.21
25	20	28	5.20	3.87	0.37	0.00	2.72	0.18
25	20	28	5.20	3.27	0.37	0.00	3.22	0.22
25	20	28	5.20	3.65	0.35	0.00	2.74	0.20
25	20	28	5.20	3.91	0.33	0.00	2.41	0.18
25	20	28	5.20	3.27	0.32	0.00	2.78	0.22
25	20	28	5.20	3.89	0.34	0.00	2.48	0.18
25	20	28	5.20	3.63	0.31	0.00	2.41	0.20



PRILOGA E: Rezultati meritev rezanja furnirne vezane plošče nazivne debeline 5 mm, z močjo laserja 40 W

moč [%]	moč [W]	hitrost [mm/s]	debelina VP [mm]	globina reza	širina reza zgoraj	širina reza spodaj	koničnos t reza	ločilna energija
50	40	16	5.20	5.20	0.55	0.39	0.88	0.48
50	40	16	5.20	5.20	0.56	0.38	0.99	0.48
50	40	16	5.20	5.20	0.51	0.43	0.44	0.48
50	40	16	5.20	5.20	0.52	0.42	0.60	0.48
50	40	16	5.20	5.20	0.53	0.42	0.60	0.48
50	40	16	5.20	5.20	0.47	0.35	0.65	0.48
50	40	16	5.20	5.20	0.51	0.42	0.50	0.48
50	40	16	5.20	5.20	0.49	0.39	0.54	0.48
50	40	16	5.20	5.20	0.49	0.33	0.88	0.48
50	40	16	5.20	5.20	0.52	0.31	1.20	0.48
50	40	20	5.20	5.20	0.50	0.28	1.20	0.38
50	40	20	5.20	5.20	0.52	0.36	0.88	0.38
50	40	20	5.20	5.20	0.44	0.37	0.44	0.38
50	40	20	5.20	5.20	0.51	0.35	0.88	0.38
50	40	20	5.20	5.20	0.54	0.32	1.21	0.38
50	40	20	5.20	5.20	0.60	0.36	1.32	0.38
50	40	20	5.20	5.20	0.55	0.35	1.10	0.38
50	40	20	5.20	5.20	0.52	0.40	0.66	0.38
50	40	20	5.20	5.20	0.51	0.33	1.04	0.38
50	40	20	5.20	5.20	0.46	0.29	0.93	0.38
50	40	24	5.20	5.20	0.52	0.24	1.58	0.32
50	40	24	5.20	5.20	0.45	0.34	0.60	0.32
50	40	24	5.20	5.20	0.53	0.28	1.38	0.32
50	40	24	5.20	5.20	0.55	0.26	1.59	0.32
50	40	24	5.20	5.20	0.49	0.23	1.43	0.32
50	40	24	5.20	5.20	0.56	0.33	1.27	0.32
50	40	24	5.20	5.20	0.53	0.26	1.53	0.32
50	40	24	5.20	5.20	0.55	0.20	1.92	0.32
50	40	24	5.20	5.20	0.48	0.26	1.25	0.32
50	40	24	5.20	5.20	0.52	0.24	1.53	0.32
50	40	28	5.20	5.20	0.55	0.13	2.30	0.27
50	40	28	5.20	4.79	0.53	0.00	3.17	0.30
50	40	28	5.20	5.20	0.54	0.13	2.25	0.27
50	40	28	5.20	5.20	0.52	0.23	1.61	0.27
50	40	28	5.20	5.20	0.48	0.19	1.61	0.27
50	40	28	5.20	5.20	0.53	0.20	1.83	0.27
50	40	28	5.20	5.20	0.51	0.10	2.25	0.27
50	40	28	5.20	5.07	0.54	0.00	3.03	0.28
50	40	28	5.20	5.20	0.56	0.15	2.25	0.27
50	40	28	5.20	5.07	0.49	0.00	2.77	0.28
50	40	32	5.20	4.79	0.45	0.00	2.68	0.26
50	40	32	5.20	4.64	0.49	0.00	3.03	0.27
50	40	32	5.20	4.69	0.55	0.00	3.37	0.27
50	40	32	5.20	4.92	0.51	0.00	2.97	0.25
50	40	32	5.20	4.80	0.55	0.00	3.30	0.26
50	40	32	5.20	4.54	0.51	0.00	3.22	0.28
50	40	32	5.20	4.90	0.53	0.00	3.10	0.26
50	40	32	5.20	4.69	0.56	0.00	3.42	0.27
50	40	32	5.20	5.08	0.54	0.00	3.03	0.25
50	40	32	5.20	4.73	0.52	0.00	3.16	0.26
50	40	36	5.20	4.22	0.47	0.00	3.20	0.26
50	40	36	5.20	4.29	0.43	0.00	2.86	0.26
50	40	36	5.20	4.17	0.43	0.00	2.98	0.27
50	40	36	5.20	4.16	0.45	0.00	3.07	0.27
50	40	36	5.20	4.20	0.51	0.00	3.47	0.26
50	40	36	5.20	4.07	0.48	0.00	3.39	0.27
50	40	36	5.20	4.39	0.47	0.00	3.08	0.25
50	40	36	5.20	4.14	0.50	0.00	3.44	0.27
50	40	36	5.20	4.11	0.55	0.00	3.82	0.27
50	40	36	5.20	3.96	0.58	0.00	4.17	0.28

PRILOGA F: Rezultati meritev rezanja furnirne vezane plošče nazivne debeline 5 mm, z močjo laserja 60 W

moč [%]	moč [W]	hitrost [mm/s]	debelina VP [mm]	globina reza	širina reza zgoraj	širina reza spodaj	koničnos t reza	ločilna energija		
75	60	16	5.20	5.20	0.60	0.51	0.49	0.72		
75	60	16	5.20	5.20	0.52	0.43	0.49	0.72		
75	60	16	5.20	5.20	0.64	0.52	0.65	0.72		
75	60	16	5.20	5.20	0.46	0.37	0.49	0.72		
75	60	16	5.20	5.20	0.54	0.44	0.60	0.72		
75	60	16	5.20	5.20	0.56	0.44	0.66	0.72		
75	60	16	5.20	5.20	0.54	0.46	0.49	0.72		
75	60	16	5.20	5.20	0.55	0.43	0.65	0.72		
75	60	16	5.20	5.20	0.57	0.38	1.03	0.72		
75	60	16	5.20	5.20	0.54	0.35	1.04	0.72		
75	60	20	5.20	5.20	0.53	0.43	0.54	0.58		
75	60	20	5.20	5.20	0.59	0.40	1.07	0.58		
75	60	20	5.20	5.20	0.49	0.41	0.43	0.58		
75	60	20	5.20	5.20	0.52	0.41	0.59	0.58		
75	60	20	5.20	5.20	0.55	0.36	1.09	0.58		
75	60	20	5.20	5.20	0.43	0.36	0.44	0.58		
75	60	20	5.20	5.20	0.57	0.44	0.71	0.58		
75	60	20	5.20	5.20	0.49	0.43	0.34	0.58		
75	60	20	5.20	5.20	0.56	0.37	1.04	0.58		
75	60	20	5.20	5.20	0.48	0.33	0.82	0.58		
75	60	24	5.20	5.20	0.52	0.36	0.88	0.48		
75	60	24	5.20	5.20	0.56	0.39	0.93	0.48		
75	60	24	5.20	5.20	0.42	0.25	0.98	0.48		
75	60	24	5.20	5.20	0.51	0.35	0.87	0.48		
75	60	24	5.20	5.20	0.54	0.32	1.20	0.48		
75	60	24	5.20	5.20	0.51	0.31	1.15	0.48		
75	60	24	5.20	5.20	0.57	0.40	0.93	0.48		
75	60	24	5.20	5.20	0.55	0.37	1.00	0.48		
75	60	24	5.20	5.20	0.51	0.32	1.09	0.48		
75	60	24	5.20	5.20	0.52	0.36	0.88	0.48		
75	60	28	5.20	5.20	0.48	0.37	0.60	0.41		
75	60	28	5.20	5.20	0.46	0.38	0.44	0.41		
75	60	28	5.20	5.20	0.39	0.33	0.32	0.41		
75	60	28	5.20	5.20	0.45	0.23	1.21	0.41		
75	60	28	5.20	5.20	0.55	0.34	1.14	0.41		
75	60	28	5.20	5.20	0.47	0.20	1.52	0.41		
75	60	28	5.20	5.20	0.58	0.32	1.45	0.41		
75	60	28	5.20	5.20	0.58	0.21	2.03	0.41		
75	60	28	5.20	5.20	0.49	0.27	1.20	0.41		
75	60	28	5.20	5.20	0.53	0.21	1.76	0.41		
75	60	32	5.20	4.62	0.53	0.00	3.26	0.41		
75	60	32	5.20	4.58	0.51	0.00	3.20	0.41		
75	60	32	5.20	4.27	0.46	0.00	3.11	0.44		
75	60	32	5.20	4.50	0.51	0.00	3.22	0.42		
75	60	32	5.20	4.33	0.54	0.00	3.54	0.43		
75	60	32	5.20	4.41	0.56	0.00	3.61	0.43		
75	60	32	5.20	4.53	0.50	0.00	3.15	0.41		
75	60	32	5.20	4.31	0.54	0.00	3.56	0.44		
75	60	32	5.20	4.69	0.49	0.00	2.97	0.40		
75	60	32	5.20	4.48	0.48	0.00	3.06	0.42		
75	60	36	5.20	4.04	0.48	0.00	3.40	0.41		
75	60	36	5.20	4.28	0.36	0.00	2.44	0.39		
75	60	36	5.20	4.20	0.47	0.00	3.19	0.40		
75	60	36	5.20	4.16	0.44	0.00	3.00	0.40		
75	60	36	5.20	4.14	0.48	0.00	3.29	0.40		
75	60	36	5.20	4.05	0.48	0.00	3.41	0.41		
75	60	36	5.20	4.82	0.43	0.00	2.55	0.35		
75	60	36	5.20	4.03	0.49	0.00	3.48	0.41		
75	60	36	5.20	4.44	0.44	0.00	2.81	0.38		
75	60	36	5.20	4.14	0.45	0.00	3.09	0.40		

PRILOGA G: Rezultati meritev rezanja furnirne vezane plošče nazivne debeline 4 mm, z močjo laserja 20 W

moč [%]	moč [W]	hitrost [mm/s]	debelina VP [mm]	globina reza	širina reza zgoraj	širina reza spodaj	koničnost reza	ločljina energija		
25	20	16	3.80	3.80	0.41	0.26	1.14	0.33		
25	20	16	3.80	3.80	0.38	0.27	0.88	0.33		
25	20	16	3.80	3.80	0.34	0.21	0.99	0.33		
25	20	16	3.80	3.80	0.37	0.25	0.88	0.33		
25	20	16	3.80	3.80	0.34	0.23	0.82	0.33		
25	20	16	3.80	3.80	0.32	0.21	0.86	0.33		
25	20	16	3.80	3.80	0.37	0.26	0.82	0.33		
25	20	16	3.80	3.80	0.34	0.27	0.51	0.33		
25	20	16	3.80	3.80	0.20	0.12	0.57	0.33		
25	20	16	3.80	3.80	0.43	0.32	0.82	0.33		
25	20	20	3.80	3.80	0.36	0.15	1.61	0.26		
25	20	20	3.80	3.80	0.32	0.15	1.30	0.26		
25	20	20	3.80	3.80	0.34	0.22	0.93	0.26		
25	20	20	3.80	3.80	0.38	0.12	1.95	0.26		
25	20	20	3.80	3.80	0.34	0.11	1.78	0.26		
25	20	20	3.80	3.80	0.31	0.16	1.07	0.26		
25	20	20	3.80	3.80	0.38	0.18	1.48	0.26		
25	20	20	3.80	3.80	0.35	0.12	1.75	0.26		
25	20	20	3.80	3.80	0.37	0.06	2.35	0.26		
25	20	20	3.80	3.80	0.34	0.08	1.93	0.26		
25	20	24	3.80	2.79	0.34	0.00	3.51	0.30		
25	20	24	3.80	2.75	0.35	0.00	3.60	0.30		
25	20	24	3.80	3.07	0.39	0.00	3.63	0.27		
25	20	24	3.80	3.80	0.41	0.12	2.25	0.22		
25	20	24	3.80	3.44	0.42	0.00	3.47	0.24		
25	20	24	3.80	3.80	0.41	0.08	2.53	0.22		
25	20	24	3.80	3.55	0.44	0.00	3.52	0.23		
25	20	24	3.80	3.59	0.34	0.00	2.67	0.23		
25	20	24	3.80	3.50	0.41	0.00	3.36	0.24		
25	20	24	3.80	2.89	0.35	0.00	3.45	0.29		
25	20	28	3.80	2.77	0.52	0.00	5.34	0.26		
25	20	28	3.80	2.56	0.42	0.00	4.66	0.28		
25	20	28	3.80	2.86	0.45	0.00	4.48	0.25		
25	20	28	3.80	2.97	0.46	0.00	4.42	0.24		
25	20	28	3.80	2.73	0.43	0.00	4.52	0.26		
25	20	28	3.80	2.59	0.45	0.00	4.95	0.28		
25	20	28	3.80	2.28	0.48	0.00	5.99	0.31		
25	20	28	3.80	2.33	0.41	0.00	5.00	0.31		
25	20	28	3.80	2.75	0.43	0.00	4.50	0.26		
25	20	28	3.80	2.45	0.41	0.00	4.80	0.29		
25	20	32	3.80	2.66	0.45	0.00	4.84	0.24		
25	20	32	3.80	2.52	0.48	0.00	5.42	0.25		
25	20	32	3.80	2.67	0.45	0.00	4.81	0.23		
25	20	32	3.80	2.50	0.41	0.00	4.70	0.25		
25	20	32	3.80	2.46	0.45	0.00	5.18	0.25		
25	20	32	3.80	2.25	0.44	0.00	5.59	0.28		
25	20	32	3.80	2.23	0.45	0.00	5.71	0.28		
25	20	32	3.80	2.27	0.41	0.00	5.18	0.28		
25	20	32	3.80	2.08	0.42	0.00	5.71	0.30		
25	20	32	3.80	2.15	0.44	0.00	5.85	0.29		
25	20	36	3.80	1.92	0.43	0.00	6.32	0.29		
25	20	36	3.80	1.87	0.43	0.00	6.64	0.30		
25	20	36	3.80	1.80	0.46	0.00	7.23	0.31		
25	20	36	3.80	2.13	0.47	0.00	6.26	0.26		
25	20	36	3.80	2.07	0.42	0.00	5.80	0.27		
25	20	36	3.80	1.90	0.40	0.00	6.03	0.29		
25	20	36	3.80	2.10	0.37	0.00	5.09	0.26		
25	20	36	3.80	2.00	0.41	0.00	5.85	0.28		
25	20	36	3.80	2.13	0.39	0.00	5.28	0.26		
25	20	36	3.80	1.94	0.41	0.00	5.99	0.29		

PRILOGA H: Rezultati meritev rezanja furnirne vezane plošče nazivne debeline 4 mm, z močjo laserja 40 W

moč [%]	moč [W]	hitrost [mm/s]	debelina VP [mm]	globina reza	širina reza zgoraj	širina reza spodaj	koničnost reza	ločilna energija		
50	40	36	3.80	3.80	0.35	0.18	1.26	0.29		
50	40	36	3.80	3.80	0.43	0.24	1.43	0.29		
50	40	36	3.80	3.80	0.44	0.18	1.96	0.29		
50	40	36	3.80	3.80	0.43	0.23	1.49	0.29		
50	40	36	3.80	3.80	0.38	0.22	1.18	0.29		
50	40	36	3.80	3.80	0.40	0.23	1.27	0.29		
50	40	36	3.80	3.80	0.38	0.24	1.06	0.29		
50	40	36	3.80	3.80	0.44	0.27	1.24	0.29		
50	40	36	3.80	3.80	0.41	0.32	0.71	0.29		
50	40	36	3.80	3.80	0.36	0.24	0.86	0.29		
50	40	40	3.80	3.80	0.41	0.18	1.76	0.26		
50	40	40	3.80	3.80	0.43	0.19	1.82	0.26		
50	40	40	3.80	3.80	0.40	0.20	1.49	0.26		
50	40	40	3.80	3.80	0.42	0.18	1.84	0.26		
50	40	40	3.80	3.80	0.41	0.12	2.12	0.26		
50	40	40	3.80	3.80	0.41	0.18	1.69	0.26		
50	40	40	3.80	3.80	0.37	0.21	1.22	0.26		
50	40	40	3.80	3.80	0.43	0.22	1.63	0.26		
50	40	40	3.80	3.80	0.40	0.20	1.46	0.26		
50	40	40	3.80	3.80	0.40	0.25	1.12	0.26		
50	40	44	3.80	3.62	0.44	0.00	3.47	0.25		
50	40	44	3.80	3.80	0.44	0.09	2.60	0.24		
50	40	44	3.80	3.54	0.44	0.00	3.56	0.26		
50	40	44	3.80	3.49	0.41	0.00	3.36	0.26		
50	40	44	3.80	3.80	0.44	0.18	2.00	0.24		
50	40	44	3.80	3.45	0.42	0.00	3.45	0.26		
50	40	44	3.80	3.49	0.40	0.00	3.25	0.26		
50	40	44	3.80	3.10	0.40	0.00	3.72	0.29		
50	40	44	3.80	2.46	0.45	0.00	5.26	0.37		
50	40	44	3.80	2.71	0.44	0.00	4.68	0.34		
50	40	48	3.80	3.04	0.43	0.00	4.00	0.27		
50	40	48	3.80	3.28	0.43	0.00	3.76	0.25		
50	40	48	3.80	3.14	0.40	0.00	3.63	0.27		
50	40	48	3.80	2.97	0.44	0.00	4.26	0.28		
50	40	48	3.80	3.61	0.39	0.00	3.06	0.23		
50	40	48	3.80	3.08	0.44	0.00	4.06	0.27		
50	40	48	3.80	3.09	0.43	0.00	4.00	0.27		
50	40	48	3.80	3.31	0.46	0.00	4.00	0.25		
50	40	48	3.80	2.98	0.43	0.00	4.12	0.28		
50	40	48	3.80	2.82	0.47	0.00	4.78	0.30		
50	40	52	3.80	3.16	0.44	0.00	3.95	0.24		
50	40	52	3.80	3.14	0.38	0.00	3.46	0.25		
50	40	52	3.80	3.03	0.41	0.00	3.83	0.25		
50	40	52	3.80	3.29	0.41	0.00	3.58	0.23		
50	40	52	3.80	2.89	0.42	0.00	4.15	0.27		
50	40	52	3.80	3.10	0.45	0.00	4.13	0.25		
50	40	52	3.80	3.12	0.43	0.00	3.93	0.25		
50	40	52	3.80	3.03	0.45	0.00	4.22	0.25		
50	40	52	3.80	2.93	0.50	0.00	4.85	0.26		
50	40	52	3.80	3.13	0.49	0.00	4.47	0.25		
50	40	56	3.80	2.90	0.46	0.00	4.54	0.25		
50	40	56	3.80	2.80	0.42	0.00	4.31	0.25		
50	40	56	3.80	2.60	0.40	0.00	4.39	0.28		
50	40	56	3.80	1.99	0.40	0.00	5.69	0.36		
50	40	56	3.80	2.58	0.40	0.00	4.43	0.28		
50	40	56	3.80	2.51	0.44	0.00	4.97	0.28		
50	40	56	3.80	2.73	0.41	0.00	4.32	0.26		
50	40	56	3.80	2.59	0.47	0.00	5.16	0.28		
50	40	56	3.80	2.43	0.44	0.00	5.14	0.29		
50	40	56	3.80	2.42	0.46	0.00	5.44	0.30		

PRILOGA I: Rezultati meritev rezanja furnirne vezane plošče nazivne debeline 4 mm, z močjo laserja 60 W

moč [%]	moč [W]	hitrost [mm/s]	debelina VP [mm]	globina reza	širina reza zgoraj	širina reza spodaj	koničnost reza	ločilna energija		
75	60	36	3.80	3.80	0.38	0.18	1.55	0.44		
75	60	36	3.80	3.80	0.49	0.29	1.55	0.44		
75	60	36	3.80	3.80	0.49	0.24	1.83	0.44		
75	60	36	3.80	3.80	0.45	0.25	1.51	0.44		
75	60	36	3.80	3.80	0.43	0.23	1.45	0.44		
75	60	36	3.80	3.80	0.43	0.23	1.53	0.44		
75	60	36	3.80	3.80	0.37	0.22	1.14	0.44		
75	60	36	3.80	3.80	0.45	0.31	1.09	0.44		
75	60	36	3.80	3.80	0.43	0.21	1.66	0.44		
75	60	36	3.80	3.80	0.50	0.28	1.72	0.44		
75	60	40	3.80	3.80	0.36	0.21	1.09	0.39		
75	60	40	3.80	3.80	0.42	0.21	1.55	0.39		
75	60	40	3.80	3.80	0.43	0.26	1.29	0.39		
75	60	40	3.80	3.80	0.39	0.28	0.83	0.39		
75	60	40	3.80	3.80	0.36	0.22	1.07	0.39		
75	60	40	3.80	3.80	0.47	0.29	1.36	0.39		
75	60	40	3.80	3.80	0.44	0.28	1.25	0.39		
75	60	40	3.80	3.80	0.44	0.27	1.27	0.39		
75	60	40	3.80	3.80	0.38	0.12	1.96	0.39		
75	60	40	3.80	3.80	0.49	0.21	2.10	0.39		
75	60	44	3.80	3.80	0.44	0.10	2.54	0.36		
75	60	44	3.80	3.80	0.47	0.21	1.95	0.36		
75	60	44	3.80	3.80	0.47	0.26	1.61	0.36		
75	60	44	3.80	3.80	0.51	0.29	1.65	0.36		
75	60	44	3.80	3.80	0.39	0.23	1.18	0.36		
75	60	44	3.80	3.80	0.45	0.23	1.71	0.36		
75	60	44	3.80	3.80	0.43	0.25	1.35	0.36		
75	60	44	3.80	3.80	0.47	0.28	1.50	0.36		
75	60	44	3.80	3.80	0.45	0.18	2.01	0.36		
75	60	44	3.80	3.80	0.47	0.17	2.26	0.36		
75	60	48	3.80	3.32	0.48	0.00	4.17	0.38		
75	60	48	3.80	3.40	0.42	0.00	3.51	0.37		
75	60	48	3.80	3.45	0.46	0.00	3.84	0.36		
75	60	48	3.80	3.80	0.39	0.28	0.83	0.33		
75	60	48	3.80	3.25	0.47	0.00	4.10	0.38		
75	60	48	3.80	2.47	0.42	0.00	4.82	0.51		
75	60	48	3.80	2.87	0.44	0.00	4.35	0.44		
75	60	48	3.80	2.66	0.38	0.00	4.07	0.47		
75	60	48	3.80	3.43	0.45	0.00	3.75	0.36		
75	60	48	3.80	3.80	0.36	0.07	2.15	0.33		
75	60	52	3.80	3.55	0.44	0.00	3.58	0.33		
75	60	52	3.80	3.60	0.41	0.00	3.28	0.32		
75	60	52	3.80	3.47	0.43	0.00	3.52	0.33		
75	60	52	3.80	3.80	0.45	0.14	2.36	0.30		
75	60	52	3.80	3.80	0.40	0.10	2.22	0.30		
75	60	52	3.80	3.72	0.41	0.00	3.13	0.31		
75	60	52	3.80	3.80	0.50	0.15	2.62	0.30		
75	60	52	3.80	3.70	0.40	0.00	3.10	0.31		
75	60	52	3.80	3.80	0.35	0.08	2.02	0.30		
75	60	52	3.80	3.24	0.43	0.00	3.78	0.36		
75	60	56	3.80	2.97	0.43	0.00	4.19	0.36		
75	60	56	3.80	3.11	0.41	0.00	3.82	0.34		
75	60	56	3.80	3.03	0.37	0.00	3.45	0.35		
75	60	56	3.80	3.45	0.39	0.00	3.28	0.31		
75	60	56	3.80	3.46	0.43	0.00	3.53	0.31		
75	60	56	3.80	3.42	0.35	0.00	2.95	0.31		
75	60	56	3.80	3.14	0.42	0.00	3.83	0.34		
75	60	56	3.80	3.23	0.44	0.00	3.90	0.33		
75	60	56	3.80	3.27	0.46	0.00	3.99	0.33		
75	60	56	3.80	3.17	0.40	0.00	3.64	0.34		